



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Aspectos Técnicos e Construtivos do Projeto de uma Ponte Estaiada

Renan Ribeiro Setubal Gomes¹, Flávia Moll de Souza Judice²

¹ Construtora Queiroz Galvão / rgomes@queirozgalvao.com

² Escola Politécnica da UFRJ/Departamento de Estruturas/ flaviamoll@poli.ufrj.br

Resumo

As obras de pontes estaiadas envolvem uma tecnologia diferenciada no ramo da Engenharia Civil. Aquelas mais recentemente realizadas e algumas em desenvolvimento lançam muitos desafios, com soluções cada vez mais arrojadas e que exigem técnicas de análise apuradas. Do ponto de vista de construção, essas realizações também exigem esmero na execução e uma interface constante com o projeto de modo que todas as premissas teóricas sejam verificadas ao longo do processo executivo ou corrigidas quando necessário. Este trabalho visa registrar, através do estudo de caso da Ponte do Saber, erguida na cidade do Rio de Janeiro, as etapas de desenvolvimento do projeto estrutural e as medidas de controle que foram empregadas para que a execução da ponte ocorresse conforme previsto em projeto, com todas as etapas construtivas sendo respeitadas.

Palavras-chave

Ponte estaiada; Ponte do Saber; análise estrutural; processo construtivo.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



1. Introdução

O número de projetos de pontes estaiadas no Brasil tem crescido nas últimas duas décadas, com notável aumento da complexidade das estruturas, que passaram a lançar desafios para projetistas e construtores. Do ponto de vista do projeto, é imperativo o uso de ferramentas de análise estrutural cada vez mais sofisticadas, e computadores com grande capacidade de processamento, com o objetivo de representar com a maior fidelidade possível as características da estrutura em operação.

Projetos de pontes estaiadas requerem também uma etapa de análise importante que represente as fases executivas da obra. Esta análise é fundamental para que, ao fim da construção, os resultados requeridos em termos de forças instaladas nos estais e elevações do tabuleiro estejam de acordo com o previsto em projeto.

A Tabela 1 indica a evolução das pontes estaiadas modernas e o crescimento dos vãos principais em todo o mundo.

Tabela 1 – Ranking dos maiores vãos estaiados até 2012

Posição no Ranking	Nome da obra	País	Vão principal	Ano de Inauguração
1	Ponte Russa	Rússia	1104 m	2012
2	Ponte Sutong	China	1088 m	2008
3	Ponte Stonecutters	Hong Kong	1018 m	2009
4	Ponte E'dong	China	926 m	2010
5	Ponte Tatara	Japão	890 m	1999
6	Ponte da Normandia	França	856 m	1995
7	Ponte Jingyue	China	816 m	2010
8	Ponte Incheon	Coréia do Sul	800 m	2009
9	Ponte Zolotoy	Rússia	737 m	2012
10	Ponte Xangai-Yangtze	China	730 m	2009

2. Estudo de caso

O objetivo deste trabalho é levantar, através do estudo de caso da Ponte do Saber, pontos críticos do projeto e construção deste tipo de obra, principalmente no que concerne à análise e monitoramento das fases executivas de um tabuleiro estaiado através do processo de balanços sucessivos.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



A Ponte do Saber possui um vão estaiado com extensão de 180m e altura total da torre de 94m. Seus estais frontais estão espaçados de 10m ao longo do tabuleiro. Na parte traseira do pilone são inseridos três pares de estai que estabilizam a torre, formando uma geometria em “V” no plano horizontal.

Os estais foram projetados em sistema de cordoalhas paralelas, galvanizadas, engraxadas e revestidas com PEAD, sistema compatível com as ancoragens disponíveis no Brasil e Europa.



Figura 1 – Vista lateral da Ponte do Saber em construção

a. Análise e Monitoramento dos Estágios de Construção

A metodologia executiva tem influência direta no projeto de pontes estaiadas. O conhecimento das diversas fases de construção que podem estar envolvidas na obra e os carregamentos de construção são de capital importância para o desenvolvimento de um projeto seguro e econômico.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Dentre os métodos executivos empregados atualmente para a construção dos tabuleiros estaiados, o processo de balanços progressivos merece destaque, sendo este adotado na maioria das obras de grande porte. Este método construtivo se mostra eficiente para a travessia de cursos d'água e em situações onde a altura entre o tabuleiro e o terreno é grande.

A análise das diferentes etapas construtivas de uma ponte estaiada é requisito fundamental para garantir que as forças instaladas nos estais e elevações do tabuleiro estejam de acordo com o previsto no projeto, ao longo de toda a construção. A modelagem computacional permite que cada estágio seja analisado separadamente, uma vez que o sistema estrutural pode mudar consideravelmente entre duas fases distintas, implicando até mesmo em solicitações durante a fase construtiva que se revelam superiores às obtidas para a condição final da estrutura. Esta fase do projeto serve prioritariamente para revisar as tensões nos estais, no tabuleiro e no pilone.

Outra questão importante atendida pela análise dos estágios de construção é a geometria (perfil) de construção do tabuleiro. No processo de construção por balanços progressivos, o tabuleiro é construído por segmentos curtos, sejam eles compostos por elementos pré-moldados ou moldados no local. Durante cada fase de construção é imprescindível conhecer as elevações projetadas de cada segmento para a correta construção do tabuleiro, de forma que resulte em uma estrutura de configuração suave e que atenda aos requisitos de tráfego e estéticos da obra.

A definição das elevações de construção pode ser um tanto quanto complexa, uma vez que a estrutura estará sujeita a carregamentos variáveis durante a construção e que não mais atuarão quando a estrutura estiver pronta. Soma-se a isto o fato de que a estrutura é muito influenciada pela variação da temperatura ambiente.

A modelagem dos estágios de construção também é fundamental para a implementação das correções necessárias durante a obra, sejam elas nas tensões aplicadas nos estais ou mesmo na geometria da obra. Com a modelagem pronta, torna-se possível realizar retroanálises sempre que as duas principais incógnitas em questão (força e deslocamento) apresentarem divergências entre as leituras de campo e o projeto.

É absolutamente necessário realizar ajustes ao longo do processo de construção do tabuleiro de acordo com as informações obtidas dos sistemas de monitoramento da obra.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Desvios durante a construção existem e alguns parâmetros teóricos adotados tais como propriedades dos materiais e rigidezes dos elementos, nem sempre condizem com a realidade.

O acompanhamento dos deslocamentos verticais do tabuleiro é uma atividade relativamente simples em obras civis. Com equipamentos topográficos modernos é possível registrar as elevações do tabuleiro ao longo da obra com precisão adequada e comparar com a análise dos estágios de construção realizada na fase de projeto.

O monitoramento dos deslocamentos horizontais da torre também é importante para a obtenção de uma conformação harmônica do tabuleiro. Esses deslocamentos são ainda mais significativos quando a estrutura é assimétrica e a rigidez do pilone é relativamente pequena. Este monitoramento normalmente é feito por meio de inclinômetros no pilone ou com pinos topográficos que permitam a leitura por meio de equipamentos de precisão.

No projeto da Ponte do Saber, onde a torre foi construída simultaneamente com o tabuleiro, tornou-se importante a realização de leituras periódicas para que se garantisse que o pilone fosse erguido seguindo seu alinhamento de projeto.

O plano de estaiamento do tabuleiro da Ponte do Saber foi elaborado pela projetista estrutural da obra, a empresa VGarambone Projetos e Consultoria Ltda. Este plano define os pontos notáveis ao longo do tabuleiro que precisam ser monitorados e suas respectivas elevações para as diversas fases executivas da obra. Em conjunto com as elevações do tabuleiro, durante e ao fim da execução, foram fornecidas as forças atuantes em cada estai da obra.

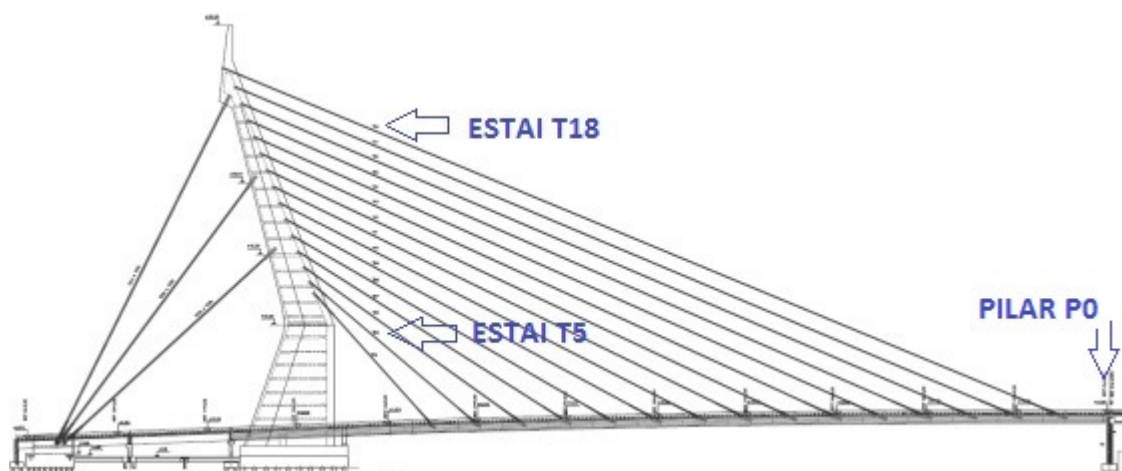


Figura 2 – Distribuição dos estais e pontos notáveis do tabuleiro



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Os estágios de construção foram divididos em 92 fases distintas, e para cada fase foram informadas no plano a elevação dos pontos notáveis do tabuleiro e as forças nos estais da obra. As leituras de força nos estais em cada uma das fases foram associadas às elevações de campo observadas no tabuleiro e o par força-elevação foi utilizado na comparação com as informações contidas no plano de estaiamento da obra.

b. Resultados obtidos

A partir do plano de estaiamento gerado pelo projetista, foi montado um procedimento de acompanhamento das forças e elevações em cada fase de construção da Ponte do Saber. A elevada flexibilidade do tabuleiro ficou evidenciada na análise dos deslocamentos previstos no momento da aplicação de força nos estais.

A Tabela 2 resume os deslocamentos verticais da extremidade do tabuleiro durante a protensão dos estais. Observa-se que este deslocamento atingiu seu valor máximo, de 636mm, na fase de protensão do estai T18.

Tabela 2 - Deslocamento vertical da extremidade do tabuleiro durante a protensão dos estais (Δ).

Fase Construtiva		Δ (m)
Estaiamento de	T05	0,114
Estaiamento de	T06	0,136
Estaiamento de	T07	0,178
Estaiamento de	T08	0,202
Estaiamento de	T09	0,310
Estaiamento de	T10	0,273
Estaiamento de	T11	0,317
Estaiamento de	T12	0,293
Estaiamento de	T13	0,423
Estaiamento de	T14	0,440
Estaiamento de	T15	0,494
Estaiamento de	T16	0,589
Estaiamento de	T17	0,634
Estaiamento de	T18	0,636



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



As forças atuantes em cada estai foram monitoradas de forma constante ao longo da obra e registradas individualmente de forma que tornasse possível identificar qualquer evento que provocasse um aumento ou decréscimo repentino. Na Figura 3 é possível verificar a evolução da força no estai T5 ao longo da obra e identificam-se os eventos significativos de alteração de força, como a concretagem de uma aduela ou o estaiamento de um cabo vizinho.

A Tabela 3 mostra a comparação entre as forças previstas e as forças reais obtidas pelo sistema de monitoramento após a introdução do carregamento de pavimentação e guarda-rodas (toda carga permanente instalada).

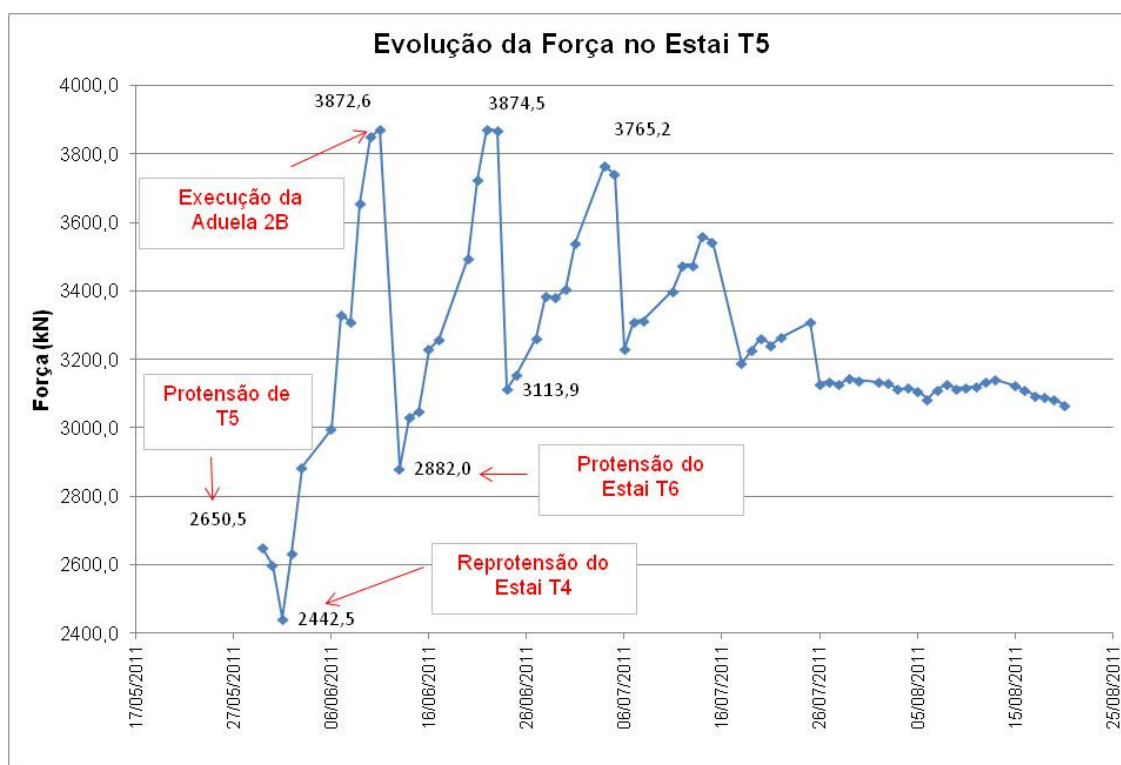


Figura 3 - Acompanhamento da força instalada no Estai T5 ao longo da obra.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Tabela 3 - Comparativo das forças nos estais após pavimentação e guarda-rodas.

Estai	Força de Campo (kN)	Força de Projeto (kN)	Diferença	σ / f_{su}
T1A	10.897,87	11.734,94	-7%	0,32
T1B	10.944,86	11.734,94	-7%	0,32
T2A	10.327,64	9.924,91	4%	0,31
T2B	10.167,62	9.924,91	2%	0,30
T3A	11.252,20	10.218,67	10%	0,33
T3B	11.108,69	10.218,67	9%	0,33
T4	3.020,95	2.657,07	14%	0,37
T5	3.206,64	2.732,97	17%	0,39
T6	3.071,37	2.755,36	11%	0,31
T7	3.030,67	3.075,75	-1%	0,31
T8	2.995,15	2.839,26	5%	0,30
T9	4.393,40	4.385,21	0%	0,30
T10	4.253,15	4.062,51	5%	0,29
T11	4.588,10	4.536,34	1%	0,31
T12	3.958,35	3.766,78	5%	0,27
T13	5.053,40	4.842,60	4%	0,35
T14	4.979,15	4.898,42	2%	0,34
T15	5.082,00	5.185,20	-2%	0,35
T16	5.703,50	5.854,77	-3%	0,39
T17	6.245,25	6.312,44	-1%	0,43
T18	6.166,05	6.446,13	-4%	0,42

Sendo que σ é a tensão atuante e f_{su} é a tensão de ruptura da cordoalha.

No caso específico do estai T5, onde a maior divergência entre a força projetada e a força real é observada, a reanálise da estrutura indicou que tal divergência não acarretaria problemas estruturais para a obra e a decisão tomada foi a de não reduzir a tensão no estai.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Com relação às elevações do tabuleiro, destacam-se duas fases executivas fundamentais para a comparação entre o previsto no plano e o realizado no campo. São elas: o instante imediatamente anterior ao apoio da ponte no pilar P0; e a fase pós-pavimentação. Denomina-se P0 o pilar de apoio do tabuleiro após o Canal do Fundão.

A etapa imediatamente anterior ao apoio no pilar P0 configura uma fase crítica, já que um aumento do deslocamento a ser imposto na ponta do tabuleiro para garantir o apoio sobre o pilar geraria solicitações, tanto no tabuleiro quanto no pilone, maiores que as solicitações previstas no projeto. Neste caso, a elevação obtida na extremidade do tabuleiro mostrou-se plenamente satisfatória para os padrões de estruturas altamente flexíveis, como é o caso de um tabuleiro estaiado. O plano de estaiamento previa um deslocamento de 235mm e o deslocamento real necessário foi de 263mm. Vale ressaltar que a cota real da ponta do tabuleiro fica sujeita à ação da temperatura ambiente e da insolação sobre o tabuleiro. Portanto, o projeto deve prever certa tolerância neste caso.

Como ilustração da influência da temperatura ambiente no greide da ponte, durante o dia 06/12/2011, as elevações na extremidade do tabuleiro, no ponto P18, foram registradas em dois momentos distintos: o primeiro registro foi feito às 7h10min com temperatura ambiente de 21,6°C; já o segundo foi feito às 17h com temperatura ambiente de 25,2°C. A leitura realizada no primeiro horário registrou a elevação +14,902 no topo da laje. No momento da segunda leitura, a cota registrada foi +14,842, indicando um deslocamento vertical do tabuleiro, de cima para baixo, no valor de 60mm.

3. Conclusões

Ao término da obra, com a conformação do greide obtida e o registro da evolução das forças nos estais, ficou comprovada a importância de um plano de estaiamento bem elaborado, com premissas e sequência executiva bem definida. Outros fatores também fundamentais para o sucesso da obra foram o controle tecnológico dos materiais, concreto e aço empregados na obra, e a alimentação do modelo estrutural a partir dos levantamentos de campo.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Observa-se que a tensão máxima instalada corresponde a $0,43 f_{su}$ e ocorre no estai T17. Os estais de retaguarda (T1 a T3), que apresentam maior importância para o bom comportamento estrutural da obra, estão com tensões da ordem de $0,30 f_{su}$.

A análise dos registros de força nos estais permitiu concluir que alguns elementos foram submetidos a tensões maiores ao longo da construção do que na fase final, quando todas as cargas permanentes estão instaladas.

Com o processo de monitoramento implantado foi possível chegar ao fim da obra com todas as forças instaladas aceitas pelo projetista estrutural, sem que fosse necessário realizar uma reprotensão global da estrutura, muito embora esta operação de reprotensão seja corriqueira e não possa ser encarada como um erro de projeto ou execução.

Referências

- FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETON, Acceptance of stay cable systems using prestressing steels, Fib Bulletin 30, Lausanne, Switzerland, 2005.
- GARAMBONE NETO, V., Plano de estaiamento para a Ponte do Saber, VGarambone Projetos e Consultoria Ltda., 2011.
- GOMES, R.R.S., Aspectos técnicos e construtivos do projeto de uma ponte estaiada. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, UFRJ, 2013.
- GIMSING, N. J.; GEORGAKIS, C. T., Cable supported bridges: concept and design. 3rd ed., Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012.