

Consideração de Efeitos Reológicos em Pontes Estaiadas

*Diogo de Faro Cidade¹
Benjamin Ernani Diaz²
Flávia Moll de S. Judice³*

Resumo

As pontes estaiadas em concreto têm sido construídas no Brasil acompanhando a tendência mundial em construir pontes importantes vencendo vãos de grande porte. Entretanto, o projeto estrutural destas obras exige verificações cada vez mais sofisticadas para que os esforços determinados nos estais, nos pilones e na viga de rigidez tenham um grau de confiabilidade suficiente para garantir segurança adequada à estrutura quanto aos estados limites de serviço, de ruptura e de fadiga. Em função da reduzida inércia da viga de rigidez é importante também, do ponto de vista da estética, que o greide final da obra tenha conformação geométrica correta e coerente com o vão da ponte. Erros na determinação do greide, considerando-se as contra-flechas impostas durante a construção, podem provocar sérios problemas na aparência final da obra. Assim, a consideração dos efeitos reológicos na determinação das solicitações e dos deslocamentos em pontes estaiadas tomam uma importância de carácter extremamente sério. Na realidade, todo o conjunto de elementos estruturais da ponte estaiada sofre com os efeitos reológicos, tais como aqueles decorrentes da retração e da fluência do concreto. Basta constatar que os pilones, assim como a viga de rigidez, ficam sujeitos a forças de compressão elevadas, portanto, passíveis de apresentar grandes deslocamentos causados pelos efeitos reológicos. Neste trabalho são apresentados os aspectos necessários para que a determinação das solicitações e deslocamentos de uma ponte estaiada seja feita a contento. Este estudo envolve modelagens específicas, que levam em consideração os efeitos não lineares geométricos, a definição da rigidez não-linear dos estais, a caracterização da retração e da fluência durante a montagem da obra, a escolha das forças impostas aos estais durante a construção, a determinação dos efeitos reológicos durante a construção e a longo prazo, assim como a definição das contra-flechas.

Palavras-chave: Pontes estaiadas de concreto; Construção de pontes; Análise não linear geométrica; Efeitos reológicos; Retração; Fluência.

1 Introdução

As pontes estaiadas estão se tornando estruturas cada vez mais comuns nas estradas brasileiras e em obras-de-arte urbanas. Os projetistas e construtores já adquiriram *know-how* suficiente para projetar e construir estruturas estaiadas realmente sofisticadas de nível internacional. O melhor exemplo dessa é a ponte estaiada com dois ramos curvos superpostos: a ponte Octávio Frias de Oliveira, na cidade de São Paulo.

A engenharia contemporânea de pontes estaiadas de concreto pressupõe a aplicação de várias regras de projeto que foram paulatinamente criadas ao longo das últimas décadas, especialmente na Europa. Destaca-se

aqui a ponte francesa de Brotonne, na França, do Eng. Jean Müller, com a qual as características modernas de projeto e de construção de pontes estaiadas de concreto se estabeleceram de forma definitiva.

Basicamente três principais fatores permitiram que essas pontes pudessem ser projetadas e construídas no mundo: a técnica de Cad, os programas sofisticados de análise não-linear e a tecnologia de estais com cabos formados por cordoalhas especiais (enceradas e plastificadas) e suas ancoragens, geralmente de origem europeia.

As pontes estaiadas são, atualmente, projetadas com auxílio de análises computacionais não-lineares de carácter geométrico. Entretanto, a análise reológica

1 M. Sc./PPE/ Escola Politécnica da UFRJ. Email: diogocidade@poli.ufrj.br

2 Prof. Emérito/Departamento de Estruturas/Escola Politécnica da UFRJ. Email: ernani.diaz@gmail.com

3 Prof. Associado/Departamento de Estruturas/Escola Politécnica da UFRJ. Email: flaviamoll@poli.ufrj.br

dessas estruturas precisa ser efetuada com mais rigor para se ter confiança no desenvolvimento das solicitações e dos deslocamentos variáveis com o tempo, provocados pela retração, pela fluência do concreto e pela fluência do aço dos estais. Para isso, é fundamental o uso de programas que consigam efetuar análises não-lineares geométricas e reológicas com base nas etapas de construção da estrutura. Ressalta-se aqui que várias sistemáticas de projeto são necessárias para se levar a bom termo todas estas análises.

Dentro desse contexto este trabalho propõe uma metodologia de projeto para a determinação das solicitações necessários para protender os estais com forças adequadas, bem como analisar os esforços e os deslocamentos da ponte levando em conta os efeitos reológicos da estrutura. As consequências da consideração dos efeitos reológicos durante e após a construção são também comentadas.

Este artigo é baseado na dissertação de mestrado (CIDADE, 2017) do primeiro autor, no Programa de Projeto de Estruturas (PPE) da Escola Politécnica da UFRJ, orientada pelos outros dois autores.

2 Dados Importantes para a Análise e Dimensionamento de Pontes Estaiadas

Deve-se comentar que não existem normas de projeto de pontes estaiadas. Entretanto, dois parâmetros de dimensionamento devem ser atendidos.

- i. No Estado Limite de Serviço (ELS), a tensão máxima dos estais não pode ultrapassar 45% da força de ruptura característica do estai;
- ii. O valor da variação de tensões com o qual as ancoragens dos estais são ensaiadas para 2 milhões de ciclos é de 200 MPa. É assim adotado este valor de ensaio para o projeto à fadiga dos estais. O ensaio de fadiga da ancoragem é detalhado pelo FIB 2005 (2005) e vários comentários sobre ele foram apresentados em Toledo (2014). É extremamente importante a avaliação da fadiga dos estais, já que a força axial dos estais é aplicada *in totum* nas suas ancoragens de extremidade. Nas estruturas protendidas, este fato não ocorre com tamanha importância.

3 A Análise Não-Linear Geométrica de Pontes Estaiadas

A ponte estaiada é composta de quatro ele-

mentos principais: as fundações, os pilones, a viga de rigidez e o conjunto de estais. Essas estruturas são concebidas comumente com um vão, com dois vãos ou com três vãos principais.

A concepção geométrica da estrutura estaiada é capital no projeto dessas pontes. Por outro lado, a concepção estrutural adequada é importante para que a estrutura, depois de pronta, consiga suportar os esforços do tabuleiro e possa encaminhar essas cargas de forma satisfatória às fundações da obra.

A análise não-linear geométrica é uma *conditio sine qua non* para que se obtenha os esforços corretos nos estais e na viga de rigidez. Pode ser constatado facilmente que, para as solicitações usuais projetados para os estais, o comportamento não-linear desses cabos pode ser conseguido considerando-os como barras retas elásticas nos modelos das estruturas (TOLEDO, 2014; ALMEIDA, 2017; CIDADE, 2017). Esse fato é devido, em essência, à força elevada a que estes estais estão submetidos. Entretanto, nada impede que os estais sejam considerados como cabos em forma de catenária em programas sofisticados de análise.

Outros pontos são destacados a seguir:

- i. o peso linear aplicado sobre os cabos deve levar em conta várias cargas adicionais atuantes nos estais, além do peso dos aços resistentes. Essas cargas adicionais são: o peso das capas de PEAD (polietileno de alta densidade) das cordoalhas; das graxas o peso das camadas de cera das cordoalhas; e o peso do tubo de PEAD externo do ao estai, como mostra Toledo (2014);
- ii. o modelo de análise com cargas permanentes precisa ser analisado, obrigatoriamente, por meio de análise não-linear geométrica sem a consideração inicial dos efeitos reológicos.

3.1 Pré-alongamento dos estais

O conceito importante de pré-alongamento deve ser definido em análise de pontes estaiadas.

Considera-se, inicialmente, o sistema principal para a análise não-linear da estrutura pelo método da rigidez. Todos os nós devem ser fixos e a estrutura de concreto só deve ter solicitações de elementos finitos com nós extremos engastados nos nós do modelo. Verifica-se que, para essa situação inicial, os cabos precisam apresentar forças iniciais de tração no sistema principal e, por consequência, possuem deformações iniciais de alongamento (positivas).

Para conseguir criar esse estado de tensões é necessário impor, no sistema principal, uma queda de

temperatura ou um encurtamento imposto (negativo) nos estais. Isso significa que os cabos, nesse sistema principal, precisam apresentar encurtamentos (negativos) prévios em relação aos alongamentos dos elementos de concreto, impostos iguais a zero. Isso é equivalente à verificação de peças de concreto protendido, em que os cabos precisam apresentar pré-alongamentos positivos quando as deformações das estruturas de concreto são todas consideradas nulas.

Depois de efetuada a análise não-linear (com a liberação de todos os nós previamente fixos), as forças de tração nos estais, impostas inicialmente, são ligeiramente modificadas e se apresentam com seus valores corretos, para o caso de carga em que atuam os carregamentos permanentes da estrutura e os encurtamentos impostos aos estais.

As análises não-lineares podem continuar a ser realizadas para cada combinação de ações. Entretanto, podem ser adicionados resultados de análises estáticas elásticas (de forma aproximada) aos resultados do modelo processado inicialmente (com peso próprio + pré-alongamento dos estais), para as ações adicionais, tais como cargas móveis, vento, retração e variação de temperatura, desde que sejam modificados os modelos, adotando para os estais as rigidezes tangentes determinadas pela fórmula de Ernst (1965), como mostrado em Cidade (2017).

Existem programas capazes de determinar os pré-alongamentos nos estais a fim de que as forças finais da análise não-linear sejam aquelas estipuladas ou desejadas pelo projetista. Os programas de análise estrutural mais difundidos no meio técnico já disponibilizam ferramentas capazes de solucionar o método iterativo de forma automática como, por exemplo, o *Load Optimizer* do programa SAP2000. A aplicação do método é apresentada detalhadamente por Cidade (2017). Existem outros métodos clássicos que podem determinar iterativamente os pré-alongamentos por meio de uma matriz de influência, como mostrado em Toledo (2014), Almeida (2017) e Cidade (2017).

4 Determinação das Forças nos Estais Durante a Fase de Montagem

As pontes estaiadas de concreto invariavelmente são executadas em balanços sucessivos. Como a viga de rigidez tem inércia relativamente baixa, as forças introduzidas nos estais, durante a construção, vão se modificando durante as diversas fases executivas. O construtor sempre tem interesse em reduzir as operações de correção das forças dos estais, o que pode implicar em inúmeros retensionamentos dos cabos para

que se consiga introduzir as forças de projeto em todos os estais.

Assim, é necessário que o projetista indique qual a força a ser aplicada numa determinada fase de montagem, em cada estai a ser montado, para que, ao fim da execução, as forças finais nos estais sejam aquelas que foram propostas inicialmente. Por isso, o estudo das fases de montagem é extremamente importante para a construção, o que é feito estudando uma desmontagem fictícia e uma posterior montagem computacional. Os estudos de desmontagem e de montagem são processados inicialmente sem qualquer efeito reológico, pois os programas não são preparados para tratar desses efeitos de forma retroativa na desmontagem.

Ademais, o projetista precisa também definir quais as contra-flechas a serem aplicadas na viga de rigidez, nas etapas de concretagem de cada aduela a ser adicionada à estrutura.

A análise das fases de construção é uma tarefa delicada e que exige um processamento extremamente cuidadoso. A praxe para a determinação do conjunto de esforços em cada fase de construção consiste de uma desmontagem das aduelas da viga de rigidez e dos estais. Na desmontagem é possível obter qual a força do estai que se apresenta em cada fase da desmontagem. Essa força é aquela que deve ser aplicada no estai correspondente durante a montagem.

A desmontagem deve seguir exatamente todas as fases previstas pelo projetista na construção da obra. Durante a execução das aduelas, especificamente, as fases construtivas usualmente constituem-se de:

- i) liberação da treliça da aduela N já concretada, uma vez que o estai P localizado à frente da aduela N foi protendido. O concreto da aduela N já atingiu resistência à compressão adequada.

As seguintes operações são realizadas a seguir:

- i) retiram-se as forças de compressão (à frente) e de tração (atrás) correspondentes somente ao peso da treliça;
- ii) efetua-se o avanço da treliça impondo forças de compressão e de tração agora em pontos avançados sobre a aduela recém concretada;
- iii) as formas da aduela N + 1 são montadas na sua posição e as armaduras da aduela N + 1 são montadas;
- iv) a aduela é concretada, mas o peso correspondente não é introduzido diretamente na aduela, pois ela está suportada pela treliça. As forças de compressão e de tração da treliça são aumentadas com o peso do concreto;

- v) instala-se o estai P + 1, situado à frente da aduela N + 1, com a sua força de projeto;
- vi) retiram-se as forças decorrentes do peso da aduela e aplicam-se no elemento, representando na aduela o seu peso correspondente. Assim, a situação anterior para a aduela N foi repetida para a aduela N + 1.

Na desmontagem, as operações são repetidas na ordem inversa.

As operações de montagem e de desmontagem da ponte do Saber, na ligação rodoviária da Ilha do Fundão à Linha Vermelha, no Rio de Janeiro, são apresentadas de forma extensa por Cidade (2017).

Mostra-se, na Figura 1, uma vista dessa ponte. A descrição da obra é feita na dissertação de Gomes (2013).

5 Procedimentos para Efetuar as Operações de Montagem da Ponte

Nos trabalhos de Almeida (2017), Silva (2017) e Cidade (2017) foram evidenciados que a operação computacional que representa a montagem precisa ser feita por meio de um processo especial designado por “estrutura fantasma”. Trata-se de um procedimento computacional de extrema importância para se conseguir resultados numéricos adequados.

Durante o estudo da montagem é necessário definir uma estrutura fictícia da viga de rigidez, inicialmente com inércia muito baixa (“estrutura fantasma”). À proporção que a viga vai sendo construída

as propriedades das aduelas da “estrutura fantasma” são modificadas para seu valor correto. Assim, o programa anexa a aduela ao modelo numa posição tangente adiante do trecho já construído.

Além disso o programa de análise precisa dispor de um procedimento computacional que permita estudar as etapas de montagem de forma automática. Durante esse processo deve-se poder variar diversos parâmetros de análise e de carregamentos, permitindo essencialmente que o modelo seja modificado em cada fase de construção. Esse procedimento automático é designado de *Staged Construction*.

6 Valores de Retração e Fluência do Concreto

Os valores de retração e de fluência devem ser sempre adotados com base em publicações atuais. Neste estudo foram utilizadas as informações contidas na norma FIB 2010 (2010). Os parâmetros dessa norma são também implementados automaticamente em programas comerciais de análises reológicas de estruturas.

7 Análise Reológica da Estrutura

A análise estrutural foi realizada com programa especializado que avalia as etapas construtivas e efetua, para cada fase de montagem, a análise reológica.

A estrutura empregada como exemplo está localizada na cidade do Rio de Janeiro. Caso tivesse sido construída em Brasília, por exemplo, a umidade rela-

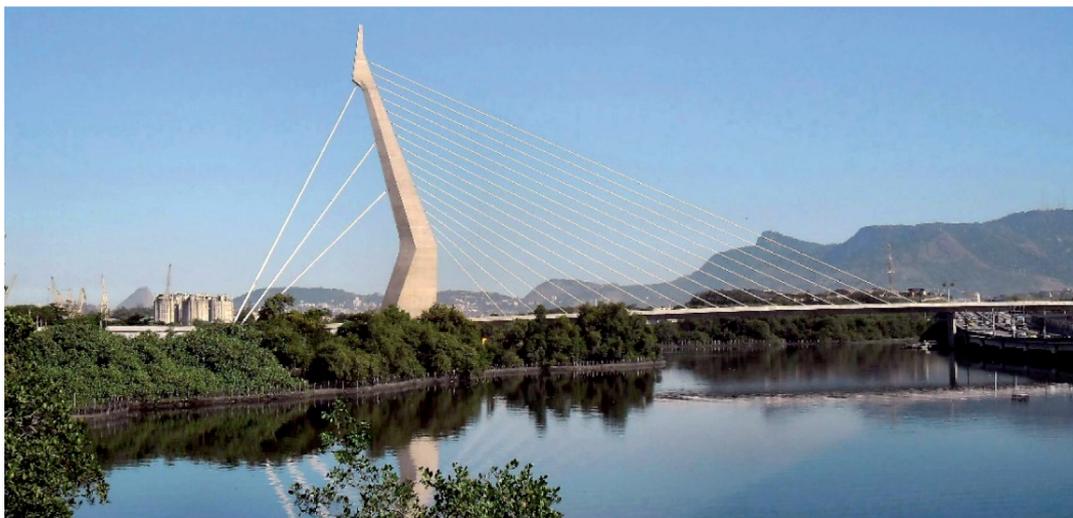


Figura 1 – Ponte do Saber, no Rio de Janeiro.

tiva do ar seria bastante diferente. Assim, buscando-se avaliar a influência da umidade no comportamento da estrutura, duas umidades diferentes foram impostas: 85% e 50%.

Dentro desse contexto também é importante avaliar como se comportam as solicitações e as flechas

da estrutura, ao final da construção, e para períodos de tempo nos quais a retração e a fluência já se estabilizaram, o que pode levar até 10 anos. Em vista desse fato, os esforços e as flechas da viga de rigidez e as forças dos estais são fornecidas para diferentes umidades e outras idades da estrutura.

Tabela 1 – Momento Fletor e Força Normal da viga de rigidez

MOMENTO FLETOR NAS ADUELAS				FORÇA NORMAL NAS ADUELAS			
Ponto Notável	Final da Montagem (SEM Realogia) [kN.m]	Diferença [kN.m]	Final da Montagem (COM Realogia) [kN.m]	Ponto Notável	Final da Montagem (SEM Realogia) [kN.m]	Diferença %	Final da Montagem (COM Realogia) [kN.m]
ADU01A	-13322	-325,7	-13648	ADU01A	-55075	-0,497%	-54802
ADU01B	-9377	-812,9	-10189	ADU01B	-55045	-0,498%	-54771
ADU02A	-2088	-363,8	-2451	ADU02A	-52970	-0,596%	-52665
ADU02B	877,9	-739,9	138,5	ADU02B	-52942	-0,596%	-52627
ADU03A	7211	-278,2	6933	ADU03A	-50708	-0,784%	-50310
ADU03B	8673	-803,9	7869	ADU03B	-50683	-0,784%	-50286
ADU04A	13498	-278,7	13220	ADU04A	-48096	-1,000%	-47615
ADU04B	14020	-863,4	13158	ADU04B	-48074	-1,000%	-47593
ADU05A	15783	-625,3	15159	ADU05A	-45626	-1,174%	-45091
ADU05B	13632	-1609	12024	ADU05B	-45606	-1,175%	-45070
ADU06A	16038	-1010	15030	ADU06A	-41773	-1,330%	-41218
ADU06B	16800	-1772	15029	ADU06B	-46262	-1,616%	-45515
ADU07A	18471	-1272	17200	ADU07A	-42690	-1,688%	-41970
ADU07B	16509	-1982	14529	ADU07B	-42675	-1,727%	-41938
ADU08A	18097	-1086	17013	ADU08A	-38639	-1,751%	-37963
ADU08B	15835	-1362	14474	ADU08B	-38624	-1,799%	-37930
ADU09A	15684	-822,4	14863	ADU09A	-35255	-1,765%	-34633
ADU09B	11802	-1457	10345	ADU09B	-35250	-1,808%	-34613
ADU010A	11466	-803,0	10664	ADU010A	-30892	-1,672%	-30375
ADU010B	7702	-1253	6450	ADU010B	-30888	-1,723%	-30356
ADU011A	7346	-687,6	6658	ADU011A	-26458	-1,522%	-26056
ADU011B	-2443	-1098	-3542	ADU011B	-31046	-1,784%	-30493
ADU012A	-2519	-489,7	-3010	ADU012A	-26367	-1,643%	-25934
ADU012B	-6068	-956,8	-7027	ADU012B	-26359	-1,671%	-25919
ADU013A	-4908	-304,0	-5214	ADU013A	-21025	-1,547%	-20700
ADU013B	-7064	-542,9	-7610	ADU013B	-21024	-1,574%	-20694
ADU014A	-4066	9,988	-4059	ADU014A	-15262	-1,596%	-15019
ADU014B	-4256	-139,5	-4398	ADU014B	-15272	-1,572%	-15033
ADU015A	167,9	196,6	361,4	ADU015A	-9342	-2,014%	-9154
ADU015B	0,000	2949	0,000	ADU015B	-14,77	-0,758%	-14,88

Tabela 2 – Forças nos estais, sem e com reologia, durante a construção

FORÇA NOS ESTAIS			
Estai	Final da Montagem (SEM Reologia) [kN]	Diferença [%]	Final da Montagem (COM Reologia) [kN]
T01	11743	-0,195%	11720
T02	9931	-0,550%	9877
T03	10225	-0,505%	10174
T04	2659	1,151%	2689
T05	2735	2,045%	2791
T06	2757	3,706%	2859
T07	3078	3,251%	3178
T08	2841	2,271%	2906
T09	4388	0,524%	4411
T10	4065	-0,176%	4058
T11	4539	-0,893%	4499
T12	3769	-0,608%	3709
T13	4846	-2,076%	4745
T14	4902	-2,251%	4791
T15	5189	-2,165%	5076
T16	5859	-1,773%	5755
T17	6316	-0,973%	6255
T18	6450	-0,151%	6441

Apresentam-se, nas Tabelas 1 e 2, as diferenças entre as solicitações na viga de rigidez e nos estais, quando da consideração ou não dos efeitos da reologia ao final da montagem. A umidade do ar adotada foi de 80%.

Nota-se que os momentos fletores, ao final da construção, apresentam valores razoavelmente diferentes entre a solução sem e com a consideração da reologia. As diferenças dos valores das forças nos estais e das forças normais da viga de rigidez não são significativas.

As flechas, por outro lado, são bem diferentes, sem e com a consideração da reologia, ao final da construção, como mostra a Figura 2.

As Figuras 3 e 4 apresentam os momentos fletores e as forças normais na viga de rigidez, para diferentes umidades (80% e 50%) e para tempos diferentes de análise (final de montagem e $t = \infty$). Nota-se que, ao longo da viga de rigidez, as variações dos momentos fletores são significativas para os tempos referentes ao final da construção e para $t = \infty$.

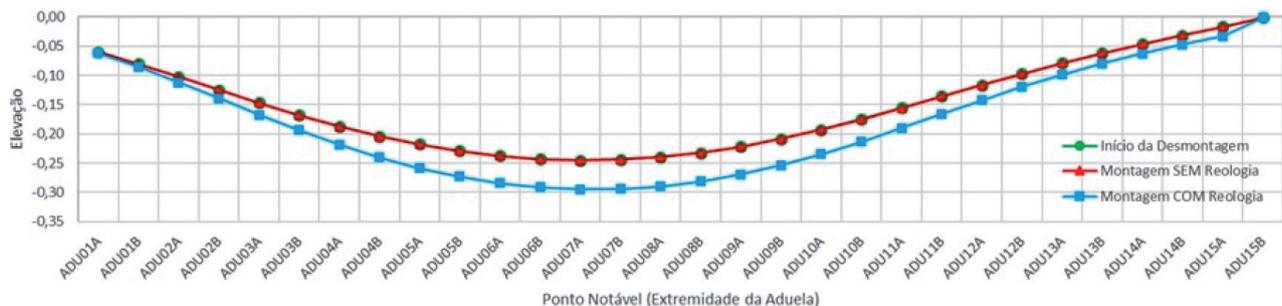


Figura 2 – Comparação das flechas considerando-se ou não a reologia.

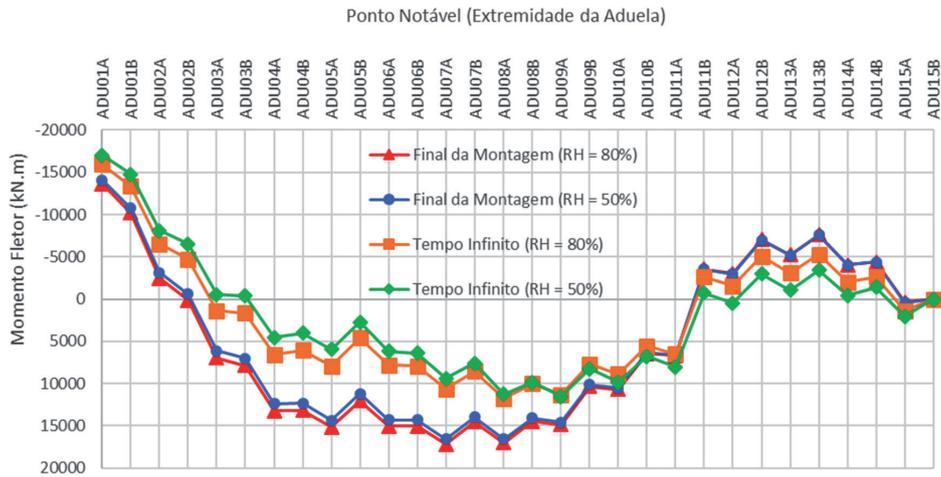


Figura 3 – Variações dos momentos fletores na viga de rigidez para diversas condições de umidade e de idade da viga de rigidez.

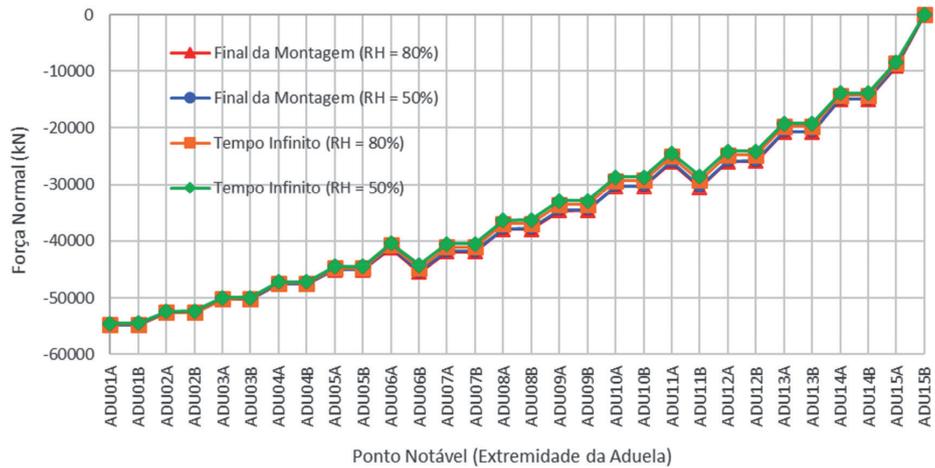


Figura 4 – Variação da força Normal ao longo da viga de rigidez para diversas condições de umidade e de idade da viga de rigidez.

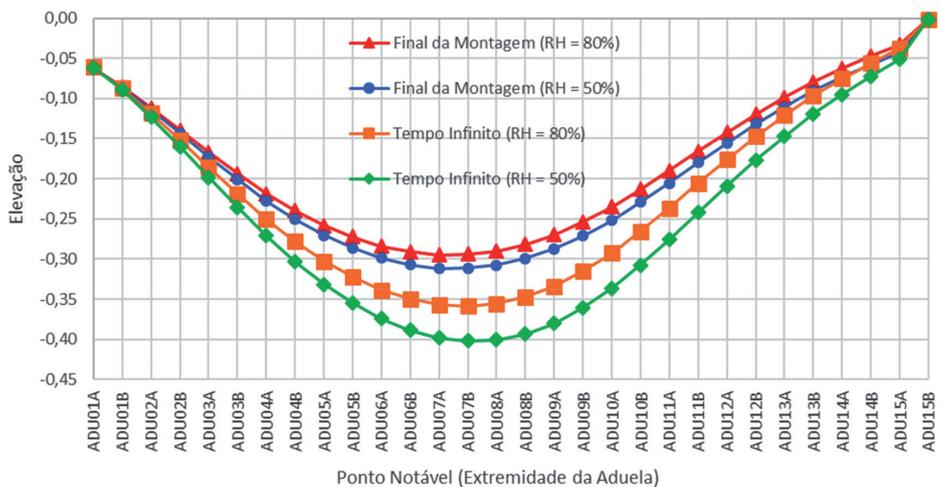


Figura 5 – Variação das flechas ao longo da viga de rigidez para diversas condições de umidade e de idade.

A Figura 5 mostra a variação das flechas ao longo da viga de rigidez, para diferentes umidades (80% e 50%) e para tempos diferentes de análise (final de montagem e $t = \infty$). Notam-se, ao longo da viga de rigidez, grandes variações de valores das flechas, chegando a cerca de 30% de aumento no meio do vão, para uma mesma umidade relativa do ar. Comparando-se as flechas na seção do meio do vão, para umidades do ar distintas, essa diferença é da ordem de 11%.

8 Conclusões

Este trabalho pretendeu mostrar como se pode efetuar a determinação das solicitações e de flechas levando-se em conta os efeitos reológicos provocados pela fluência do concreto.

Para isso, é necessário ter à disposição do projetista um programa capaz de analisar as fases de montagem da ponte e, ao mesmo tempo efetuar as análises reológicas da estrutura.

Foram usados neste trabalho os parâmetros de retração e fluência da norma FIB 2010 (2010).

É preciso ter extremo cuidado na definição das etapas construtivas e nos processos de desmontagem e montagem da viga de rigidez. Qualquer engano nestas definições implica em resultados discordantes entre os valores obtidos na desmontagem e montagem. A montagem precisa apresentar valores finais praticamente iguais ao do início da desmontagem sem a consideração da fluência e retração.

A aplicação dos conceitos de “estrutura fantasma” é absolutamente necessária para analisar a operação de montagem da estrutura.

Há de se notar que, durante a construção, os efeitos reológicos devem ser considerados para que os esforços de flexão sejam determinados com adequada precisão. Além disso o estudo das flechas também se mostra importante com a consideração dos efeitos reológicos durante a construção. A consideração da reologia na montagem permite analisar com maior precisão a definição das forças a serem aplicadas nos estais durante a execução.

É evidente que a influência da umidade do ar tem importância na determinação dos momentos de flexão e também nas flechas. Para estruturas construídas em climas mais secos os efeitos reológicos são mais importantes, como era de se prever.

A avaliação dos efeitos reológicos para $t = \infty$ também são importantes para os momentos de flexão e para os valores das flechas da viga de rigidez.

6 Referências

- ALMEIDA, A. E. F. D. Análise de Etapas Construtivas em Pontes Estaiadas. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica U.F.R.J. Rio de Janeiro, p. 146. 2017.
- CIDADE, D. F. Análise Reológica Computacional das Etapas Construtivas de Ponte Estaiada. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, UFRJ, 2017.
- COMPUTERS AND STRUCTURES. Technical Note – CSI Load Optimizer. Computers and Structures. California, USA. 2011.
- ERNST, H. J. Der E-Modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhanges. Der Bauingenieur, v. 40. n. 2, p. 1718-1731. 1965.
- FIB-FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, Acceptance of Stay Cable Systems Using Prestressing Steels. Lausanne, 2005.
- FIB-FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, Model Code for Concrete Structures. 1ª ed. Lausanne: Ernst & Sohn, 2010.
- GOMES, R. R. S. Aspectos Técnicos e Construtivos do Projeto de uma Ponte Estaiada. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica U.F.R.J. Rio de Janeiro, p. 129. 2013.
- SILVA, A. A. Estudo das Fases Construtivas do Vão Principal de uma Ponte Estaiada. Projeto de Graduação – Escola Politécnica U.F.R.J. Rio de Janeiro, p. 196. 2017.
- TOLEDO, R. L. S. D. Dimensionamento de Vigas de Rigidez de Concreto de Pontes Estaiadas. Dissertação de Mestrado – COPPEE U.F.R.J. Rio de Janeiro, p. 175. 2014.