



Consideração de Efeitos Reológicos em Pontes Estaiadas

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

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

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

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

Resumo

As pontes estaiadas em concreto armado têm sido construídas no Brasil acompanhando a tendência mundial em construir pontes importantes vencendo vãos de grande porte. Entretanto, o projeto destas obras exige verificações cada vez mais rebuscadas para que, durante o projeto, 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. Decorrente da baixa rigidez 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 as contra-flechas impostas durante a construção, podem provocar sérios problemas na aparência final da obra. Assim, a consideração dos efeitos reológicos na determinação dos esforços 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 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 esforços de compressão elevados, portanto passíveis de apresentar deslocamentos elevados causados pelos efeitos reológicos. Nesse trabalho são apresentados os aspectos necessários para que a determinação dos esforços e deslocamentos de uma ponte estaiada seja feita a contento. Esse 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.

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 disto é a ponte estaiada com dois ramos curvos superpostos: a ponte Octávio Frias de Oliveira, na cidade de São Paulo.

Basicamente, três grupos de tecnologia moderna permitiram que esses projetos pudessem ser projetados e construídos no Brasil: a técnica de Autocad, os programas sofisticados de análise não-linear e a tecnologia moderna de estais com cabos formados

por cordoalhas engraxadas e as suas ancoragens, geralmente com base em tecnologia europeia.

As pontes estaiadas são, atualmente, projetadas com auxílio de análises computacionais não lineares de caráter geométrico. Entretanto, a análise reológica destas estruturas precisa ser efetuada com mais rigor para se ter confiança no desenvolvimento dos esforços e dos deslocamentos variáveis com o tempo, provocados pela retração, pela fluência do concreto e pela fluência do aço dos estais. O importante a comentar sobre estas análises reológicas é que já se dispõe de programas comerciais para poder efetuar-las. Para a análise destes esforços é necessário utilizar programas de análise que consigam efetuar análises não lineares geométricas e análises reológicas com base nas etapas de construção da estrutura. Várias sistemáticas de projeto são necessárias para se levar a bom termo todas estas análises.

Este trabalho apresenta a metodologia para se determinar os esforços necessários para protender os estais durante a sua construção com as suas forças adequadas e logo a seguir analisar os esforços e os deslocamentos da ponte levando em conta os efeitos reológicos da estrutura. As consequências da consideração dos efeitos reológicos durante a construção e depois da construção serão comentadas.

Este artigo é baseado na dissertação de mestrado (CIDADE, 2017) do primeiro autor na Escola Politécnica da UFRJ orientada pelos outros dois autores.

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. No Estado Limite de Serviço a tensão máxima dos estais não pode ultrapassar o valor de 45% da força de ruptura característica do estai. Já o valor da variação de tensões com o qual as ancoragens dos estais são ensaiadas para 2 milhões de ciclos é de 200MPa. 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.

A análise não linear geométrica de pontes estaiadas

A ponte estaiada é composta de quatro elementos principais: as fundações, os pilones, a viga de rigidez e o conjunto de estais. Estas estruturas são concebidas comumente com um vão, com dois vãos e com três vãos principais.

A concepção geométrica da estrutura estaiada é capital no projeto destas pontes. A concepção estrutural adequada é importante para se conseguir que a estrutura, depois de pronta, consiga suportar os esforços do tabuleiro e possa encaminhar estas cargas de forma satisfatória às fundações da obra. A tecnologia moderna 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.

A concepção da ponte estaiada moderna de concreto deveu muito ao Eng. Jean Müller com a construção da ponte francesa de Brotonne, na França, na qual as

características modernas de projeto e de construção de pontes estaiadas de concreto ficaram estabelecidas de forma definitiva.

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 os esforços usuais projetados para os estais, o comportamento não-linear destes cabos pode ser conseguido considerando-os como barras retas elásticas nos modelos das estruturas (TOLEDO, 2014; ALMEIDA, 2017; CIDADE, 2017). Este 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. Deve ser lembrado que o peso linear aplicado sobre os cabos deve levar em conta várias cargas adicionais atuantes nos estais além do peso dos aços resistentes. Estas cargas adicionais são: peso das capas de PEAD (polietileno de alta densidade) das cordoalhas, das graxas das cordoalhas e do tubo de PEAD externo do estai, como mostra TOLEDO (2014).

O modelo de análise com as cargas permanentes precisa ser analisado obrigatoriamente por meio de uma análise não-linear geométrica sem a consideração de efeitos reológicos inicialmente.

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. Os nós são todos fixos e a estrutura de concreto só possui esforços de elementos finitos com nós extremos considerados engastados nos nós do modelo. Verifica-se que, para esta situação inicial de análise, os cabos precisam apresentar forças iniciais de tração neste sistema principal e, por consequência, possuem inicialmente deformações de alongamento (positivas). Para se conseguir criar este estado de tensões é necessário impor, no sistema principal, uma queda de temperatura ou um encurtamento imposto (negativo) nos estais. Isto significa que os cabos, neste sistema principal, precisam apresentar encurtamentos (negativos) prévios em relação aos alongamentos dos elementos de concreto impostos iguais a zero. O conceito aqui 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 da análise não-linear efetuada (com a liberação de todos os nós previamente fixos), as forças de tração nos estais, inicialmente impostas, são ligeiramente modificadas e se apresentam com as forças corretas 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 serem feitas 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, 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 de modo a que as forças finais da análise não-linear sejam as forças estipuladas ou desejadas nos estais 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).

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 de construção. O construtor sempre tem interesse em reduzir as operações de acerto das forças dos estais, o que pode implicar em inúmeras protensões nos 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 pelo projetista. 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. O projetista, neste estudo, 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. Os estudos de desmontagem e de montagem são processados sem qualquer efeito reológico inicialmente, pois os programas não são preparados para tratar os efeitos reológicos de forma retroativa na desmontagem.

A análise das fases de construção é uma determinação delicada que exige um processamento extremamente cuidadoso. A praxe para a determinação do conjunto de esforços em cada fase de construção é conseguida por meio de uma desmontagem das aduelas da viga de rigidez e dos estais. Na desmontagem é possível então determinar qual a força do estai que se apresenta em cada fase da desmontagem. Esta 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 execução da obra. Durante a execução das aduelas, especificamente, as fases construtivas costumam ser as descritas a seguir:

- i) A treliça é liberada da aduela N já concretada, já que o estai P localizado à frente da aduela N foi protendido. O concreto da aduela N já atingiu sua resistência adequada.

As seguintes operações de construção são executadas 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 são apresentadas de forma extensa para a ponte do Saber, na ligação rodoviária da Ilha do Fundão à Linha Vermelha, no Rio de Janeiro (CIDADE, 2017).

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

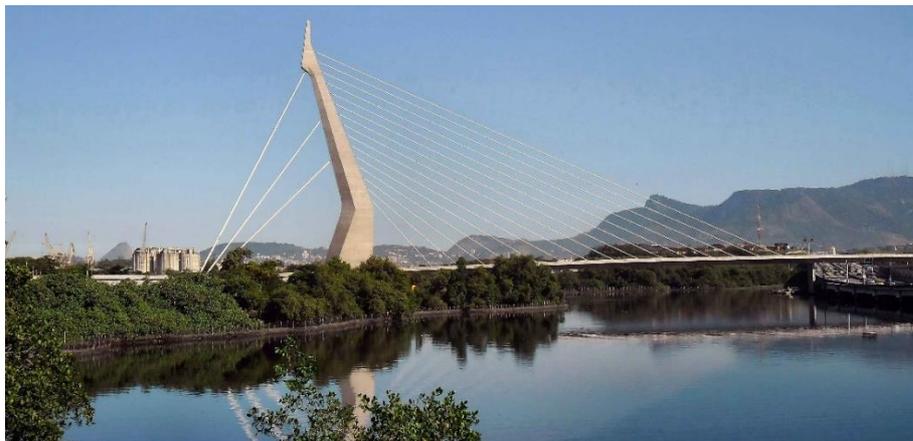


Figura 1- Ponte do Saber no Rio de Janeiro.

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 rigidez 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 para permitir estudar as etapas de montagem de forma automática. Durante este processo, deve-se poder variar diversos parâmetros de análise e de carregamentos, permitindo essencialmente que o modelo seja modificado em cada fase de construção. Este procedimento automático é designado de *Staged Construction*.

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 desta norma são também implementados automaticamente em programas comerciais de análises reológicas de estruturas.

Análise reológica da estrutura

A análise reológica da estrutura foi efetuada com programa especializado que consegue estudar as fases de montagem e efetuar também, para cada fase de montagem, a análise reológica. A estrutura estudada, como exemplo, está localizada no Rio de Janeiro. Caso a estrutura fosse construída, por exemplo, em Brasília a umidade seria bastante diferente. Nas análises efetuadas, duas umidades diferentes foram impostas à estrutura: 85% e 50%, para estudar a influência da umidade no comportamento estrutural.

Por outro lado, é importante avaliar como se comportam os esforços e as flechas, para a idade da estrutura ao final da construção e para períodos de tempo nos quais a retração e a fluência já se estabilizaram, o que pode ser 10 anos. Em vista deste fato, os esforços e as flechas da viga de rigidez e os esforços dos estais são fornecidos para diferentes umidades e outras idades da estrutura.

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

Tabela 1- Momento Fletor e de Força Normal da viga de rigidez.

MOMENTO FLETOR NAS ADUELAS				FORÇA NORMAL NAS ADUELAS			
Ponto Notável	Final da Montagem (SEM Reologia) [kN.m]	Diferença [kN.m]	Final da Montagem (COM Reologia) [kN.m]	Ponto Notável	Final da Montagem (SEM Reologia) [%]	Diferença [%]	Final da Montagem (COM Reologia) [kN]
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%	-52655
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
ADU10A	11466	-803,0	10664	ADU10A	-30892	-1,672%	-30375
ADU10B	7702	-1253	6450	ADU10B	-30888	-1,723%	-30356
ADU11A	7346	-687,6	6658	ADU11A	-26458	-1,522%	-26056
ADU11B	-2443	-1098	-3542	ADU11B	-31046	-1,784%	-30493
ADU12A	-2519	-489,7	-3010	ADU12A	-26367	-1,643%	-25934
ADU12B	-6068	-956,8	-7027	ADU12B	-26359	-1,671%	-25919
ADU13A	-4908	-304,0	-5214	ADU13A	-21025	-1,547%	-20700
ADU13B	-7064	-542,9	-7610	ADU13B	-21024	-1,574%	-20694
ADU14A	-4066	9,988	-4059	ADU14A	-15262	-1,596%	-15019
ADU14B	-4256	-139,5	-4398	ADU14B	-15272	-1,572%	-15033
ADU15A	167,9	196,6	361,4	ADU15A	-9342	-2,014%	-9154
ADU15B	0,000	2,949	0,000	ADU15B	-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	-1,608%	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

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.

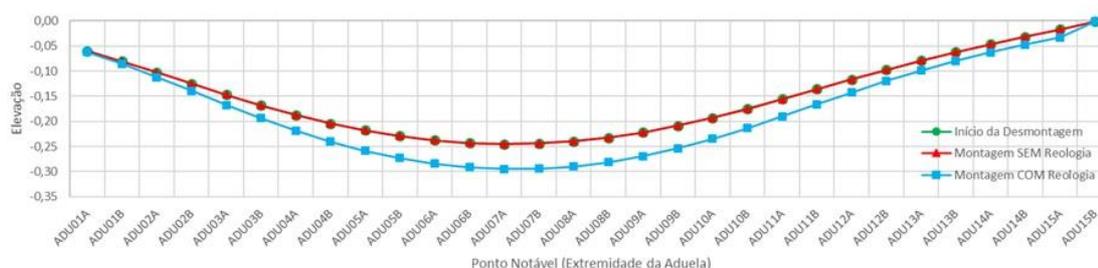


Figura 2- Comparação das flechas considerando ou não a reologia.

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 $t=\infty$.

Ponto Notável (Extremidade da Aduela)

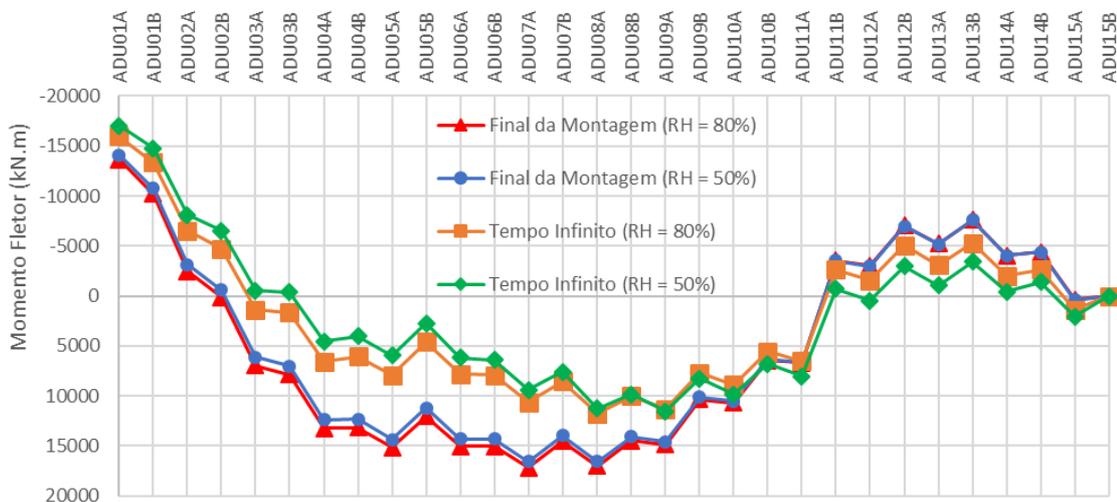


Figura 3- Variações dos momentos fletores na viga de rigidez para diversas condições de umidade e de idade da viga de rigidez.

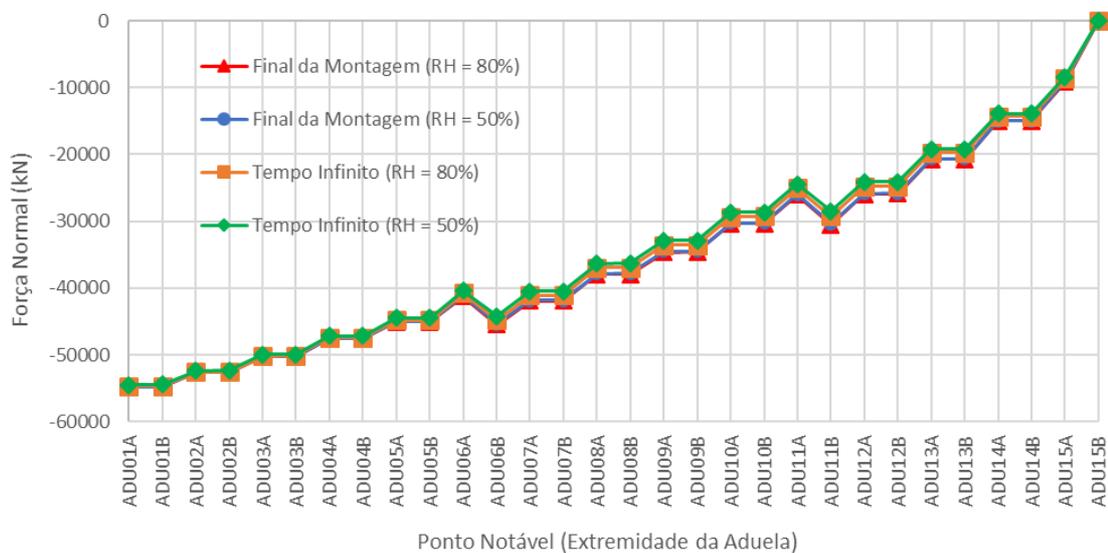


Figura 4 – Variação da força Normal ao longo da Viga de Rigidez para diversas condições de umidade e de idade da viga de rigidez.

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%.

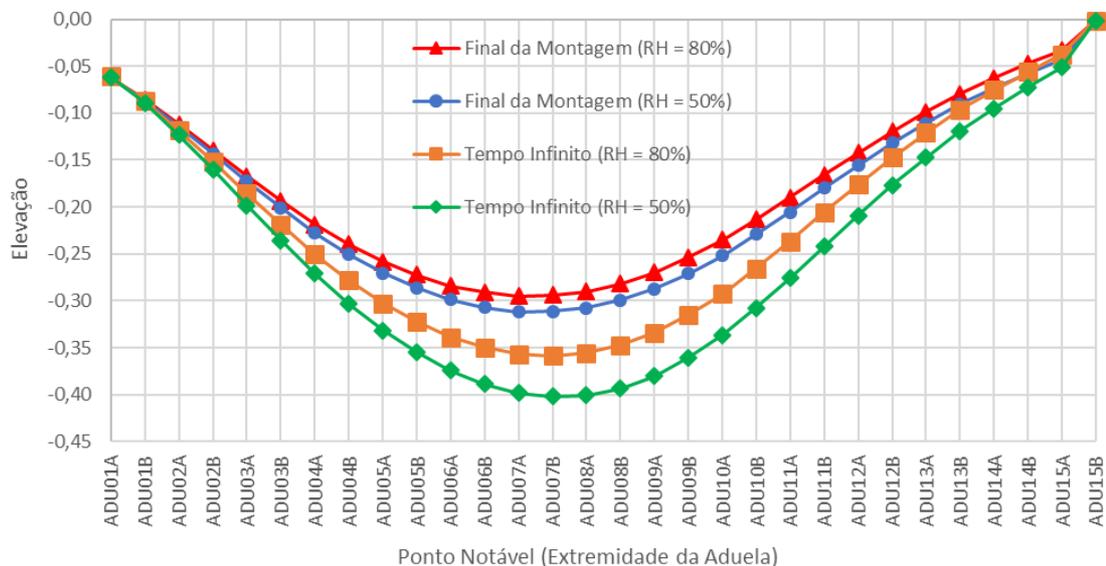


Figura 5 - Variação das flechas ao longo da viga de rigidez para diversas condições de umidade e de idade.

Conclusões

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

Para isto, 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 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 esforços 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 esforços de flexão e para os valores das flechas da viga de rigidez.

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. 1. 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.