



# 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

## Um método racional para aplicação de contraflechas em pontes construídas por segmentos sucessivos: pontes em consolos sucessivos e estaiadas.

### Uma aplicação real.

Rui Oyamada<sup>1</sup>

Renato Oshiro<sup>2</sup>

Alexandre Magno Lima Cardoso<sup>3</sup>

Hideki Ishitani<sup>4</sup>

- 1- Prof. Dr. da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- EPUSP/ OUTEC- Engenharia – LTDA/ Diretor/ rui.oyamada@outec.com.br.
- 2- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- EPUSP/ OUTEC – Engenharia - LTDA/ Engenheiro Civil/ renato@outec.com.br.
- 3- Mestre pela Escola de Engenharia São Carlos da Universidade de São Paulo– EESC/ OUTEC- Engenharia – LTDA/ Engenheiro Civil/ alexandre.magno@outec.com.br.
- 4- Prof. Dr. da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/ OUTEC- Engenharia – LTDA/ Consultor/ hideki@usp.br.

### Resumo

Para garantir o greide de projeto nas pontes construídas por segmentos devem ser definidas contraflechas adequadas na construção, contraflechas de referência (CR). Em pontes curvas em planta requer-se também, o controle de rotações do tabuleiro para garantir a superelevação de projeto. Vários fatores como cargas, temperatura diferencial, fluência, retração do concreto, relaxação das armaduras, maturidade do concreto e tempo de execução das aduelas influenciam nas flechas diferidas ao longo da execução da obra e devem ser considerados no cálculo das contraflechas. Este artigo descreve um método racional para fixação das cotas de execução dos segmentos da ponte considerando devidamente as diferenças entre as contraflechas de referência (CR) e as cotas levantadas em cada etapa da construção, cota medida (CM). É apresentada uma aplicação do método em um viaduto que dá saída do bairro Alphaville para a Rodovia Presidente Castelo Branco em Barueri, São Paulo.

### Palavras-Chave

ponte; estaiada; balanços sucessivos; consolos sucessivos; contraflecha; flecha.

### 1. Introdução

Nas pontes construídas por segmentos devem ser definidas contraflechas adequadas na construção, contraflechas de referência (CR), para se garantir o greide de projeto. Em pontes curvas em planta requer-se também, o controle de rotações do tabuleiro.

Vários são os fatores que afetam as flechas: cargas, temperatura diferencial, fluência e retração do concreto, relaxação das armaduras, maturidade do concreto, tempo de execução



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

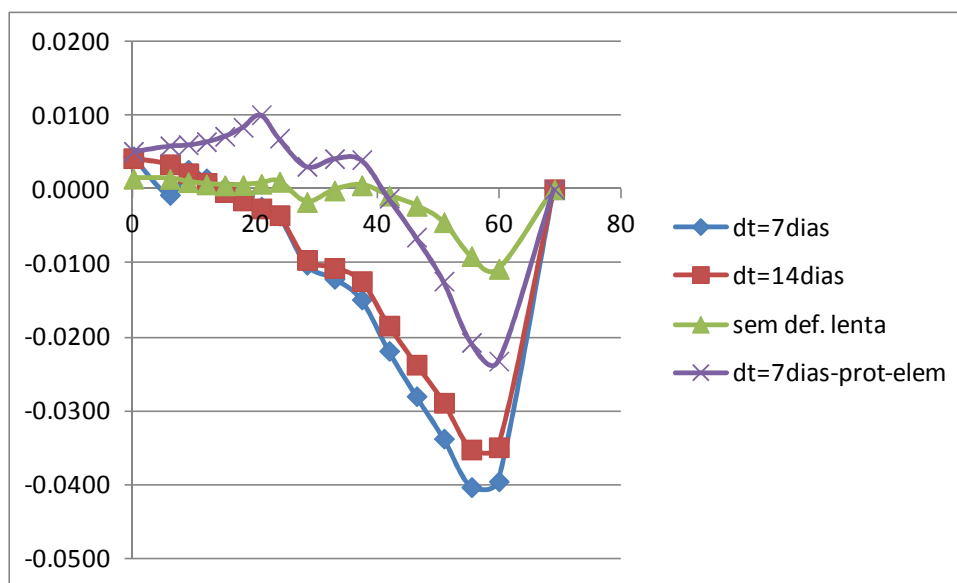
21,22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



das aduelas, entre outros. A Figura 1 apresenta diagramas de contraflechas em um viaduto com dois vãos de 71m, curvo em planta, em função de alguns parâmetros: sem efeito progressivo de deformação lenta, ciclo de execução de aduelas de 7 dias e 14 dias considerando a deformação lenta e armadura de protensão incorporada no concreto para ciclo de 7 dias. Observa-se a grande influência da deformação lenta, chegando a quadruplicar a contraflecha máxima de cerca de 10mm para cerca de 40mm, bem como a influência do ciclo de execução das aduelas que aumenta cerca de 10% quando se muda de 7 dias para 14 dias e a forte redução das contraflechas quando se admite a armadura de protensão incorporada no concreto.



**Figura 1 – Contraflechas em função de alguns parâmetros.**

Normalmente, para minimizar o efeito da temperatura diferencial faz-se o tratamento das cotas da obra na situação de menor temperatura diferencial entre as faces superior e inferior do tabuleiro, que costuma ocorrer nas primeiras horas do dia (MATHIVAT, 1980). Nesta situação as flechas correspondentes a esse fenômeno são bastante reduzidas e poderiam ser desprezadas.



## 2. Determinação das contraflechas

Considere um balanço sucessivo constituído de  $n + 1$  aduelas:  $ad_0, ad_1, \dots, ad_n$ , conforme ilustra a Figura 2.

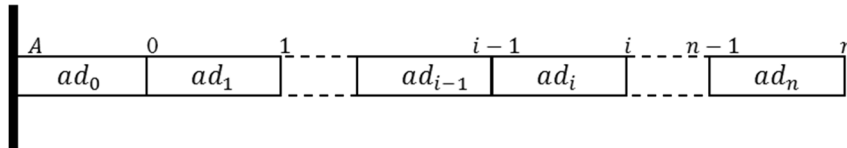


Figura 2 – Balanço sucessivo com  $n$  aduelas

Conforme Poldony (1982) e Oyamada (2004) sejam:

$a_{i,j}^{(isol)}$  com  $\{j = 0, \dots, n\}$  os deslocamentos correspondentes à construção da aduela  $ad_i$ , isoladamente;  $i$  indica a aduela e  $j$  as extremidades das respectivas aduelas.

$a_{i,j}^{(acum)}$  os deslocamentos acumulados no ponto  $j$  até a aduela  $ad_i$ , dado pela equação (1).

$$a_{i,j}^{(acum)} = \sum_{k=0}^i a_{k,j}^{(isol)} \text{ com } \{i = 0, \dots, n\} \quad (1)$$

$a_{n,j}^{(acum)}$  com  $\{j = 0, \dots, n\}$  deslocamentos ao finalizar o balanço.

Para se ter os deslocamentos anulados ao final da construção deve-se começar com as cotas virtuais  $-a_{n,j}^{(acum)}$  com  $\{j = 0, \dots, n\}$ .

Acrescentando os deslocamentos  $a_{i,j}^{(acum)}$  obtém-se os diagramas de contraflecha para as respectivas aduelas  $i$ .

Ou seja, o diagrama de contraflechas para a aduela  $ad_i$  é dada pela equação 2.

$$a_{i,j}^{(ctfl)} = a_{i,j}^{(acum)} - a_{n,j}^{(acum)} \text{ com } \{j = 0, \dots, n\}. \quad (2)$$

A Figura 3 apresenta alguns dados relativos a um balanço sucessivo constituído de 10 aduelas.



# 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:

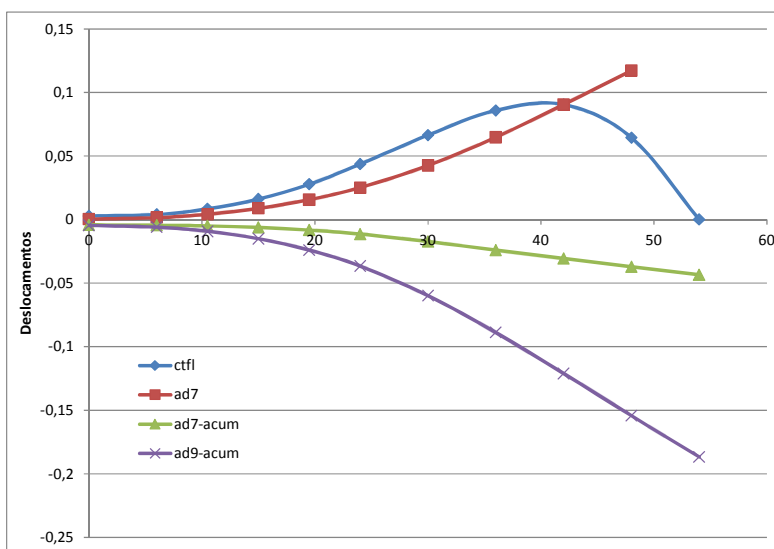


Figura 3 – balanço sucessivo hipotético de 10 aduelas

Os diagramas são:

ctfl : diagrama contendo as contraflechas da extremidade final de cada aduela construída;

ad7 : diagrama de deslocamentos após a execução da aduela  $ad_8$  considerando as contraflechas; apresenta também, as cotas da forma para construção da aduela seguinte,  $ad_8$ ;

ad7-acum : diagrama de deslocamentos acumulados até a  $ad_7$ ;

ad9-acum : diagrama de deslocamentos acumulados até a  $ad_9$ .

A treliça de sustentação da forma apresenta por si só uma deformação provocada pelo peso do concreto fresco. Este valor deve ser considerado junto à extremidade da forma.

Em pontes curvas em planta requer-se considerar também as contraflechas rotacionais das seções do tabuleiro para contrabalançar as rotações das seções provocadas pelas cargas. Lembrar que se deve considerar a sobrelevação transversal quando ela for incorporada à rotação da seção.

## 2.1. Definição das cotas de execução dos segmentos na obra

Normalmente, são utilizadas na obra as cota absolutas. Considere a Figura 4 onde:

$P_a$  e  $P_b$  correspondem às extremidades da aduela construída (aduela  $i$ );

$P_c$  corresponde à extremidade da forma para concretagem da aduela  $i+1$ ;



# 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:

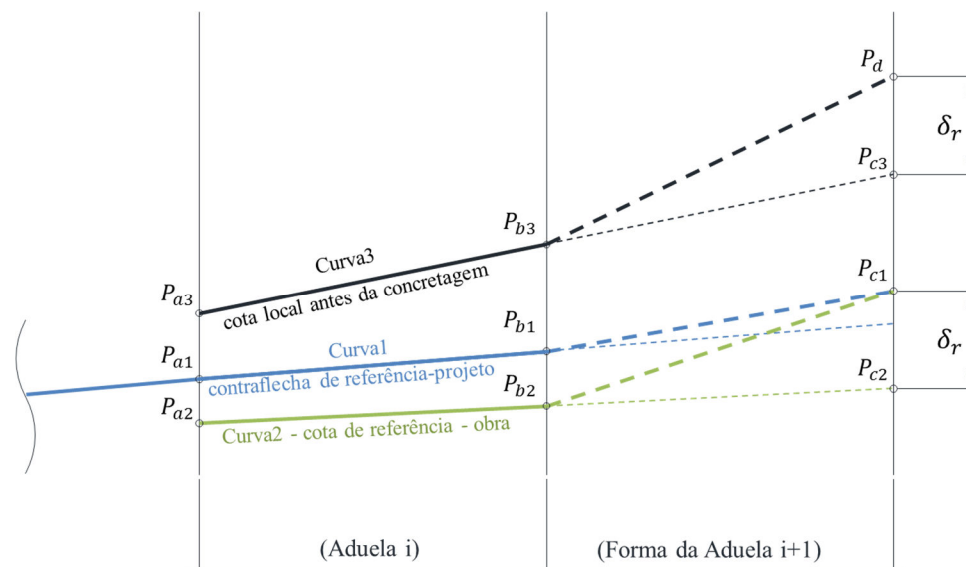


$\delta_r$  é a contraflecha relativa, já considerada a deformação da treliça. Ela permite definir a cota da forma da aduela considerando adequadamente o efeito da temperatura diferencial correspondente à hora da concretagem;

Curva1: diagrama de contraflechas de referência definida no projeto ( $P_{a1}, P_{b1}, P_{c1}$ );

Curva2:  $P_{a2}$  e  $P_{b2}$  são as cotas obtidas na obra para as extremidades da aduela  $i$  nas primeiras horas do dia visando minimizar o efeito da temperatura diferencial;

Curva3:  $P_{a3}$  e  $P_{b3}$  são as cotas obtidas na obra imediatamente antes da concretagem da aduela  $i + 1$ , que assim incluem o efeito da temperatura diferencial, e  $P_d$  é a cota da extremidade da forma.



**Figura 4 – Definição das cotas de execução**

$P_{c1}$  na Curva1 é a cota da extremidade da forma para concretagem da aduela  $i + 1$  já considerada a deformação da treliça.

$P_{c2}$  na Curva2 é obtida pela interseção da projeção da reta ( $P_{a2}, P_{b2}$ ) com a seção da extremidade da forma.

$\delta_r$  é a contraflecha relativa dada pela diferença entre  $P_{c1}$  e  $P_{c2}$ .

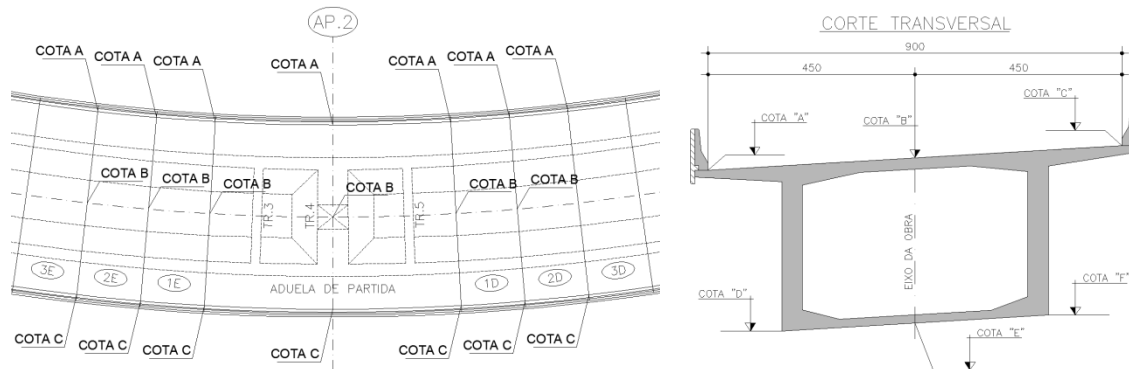
$P_{c3}$  na Curva3 é obtida pela interseção da projeção da reta ( $P_{a3}, P_{b3}$ ) com a seção da extremidade da forma.

$P_d$  é a cota da extremidade da forma antes da concretagem da aduela  $i + 1$  e é definida adicionando a  $P_{c3}$  o valor de  $\delta_r$ .



## 2.2. Procedimento para Controle de flechas

### 2.2.1. Levantamento topográfico nos pontos de controle.



**Figura 5 - Locação dos pontos para controle**

O levantamento topográfico deve ser feito após cada etapa (concretagem, protensão e avanço da treliça), sempre no período da manhã, de forma a minimizar o efeito da temperatura diferencial. A figura 6 apresenta um levantamento das cotas em campo.

ADUELA	ADUELA DE PARTIDA									ADUELA 1								
	CONCRETAGEM			PROTENSÃO			AVANÇO DA TRELIÇA			CONCRETAGEM			PROTENSÃO			AVANÇO DA TRELIÇA		
	HORA:	DATA:		HORA:	DATA:		HORA:	DATA:		HORA:	DATA:		HORA:	DATA:		HORA:	DATA:	
	COTA A	COTA B	COTA C	COTA A	COTA B	COTA C	COTA A	COTA B	COTA C	COTA A	COTA B	COTA C	COTA A	COTA B	COTA C	COTA A	COTA B	COTA C
2E																		
1E										765,392	765,637	765,866	765,391	765,638	765,867	762,392	765,638	765,867
PartidaE	765,399	765,660	765,917	765,398	765,655	765,910	765,409	765,656	765,894	765,410	765,657	765,898	765,411	765,657	765,897	765,411	765,657	765,896
PartidaD	765,408	765,685	765,942	765,408	765,680	765,934	765,416	765,684	765,930	765,417	765,685	765,930	765,419	765,685	765,930	765,418	765,685	765,929
1D	765,393	765,648	765,912	765,395	765,651	765,902	765,404	765,644	765,895	765,405	765,646	765,894	765,405	765,647	765,896	765,406	765,649	765,895
2D										765,378	765,618	765,858	765,378	765,617	765,858	765,372	765,616	765,857

**Figura 6 -Exemplo de tabela fornecida pela obra**

### 2.2.2. Determinação das cotas para posicionamento das formas.

Utilizando as cotas na fase após o avanço da treliça é possível determinar a contraflecha relativa que pode ser utilizada para posicionamento das formas em qualquer hora do dia.

- Cálculo da cota projetada com as cotas levantadas em campo ( $P_{c2}$ )
- Cálculo da cota absoluta para posicionamento das formas ( $P_{c1}$ )
- Cálculo da contraflecha relativa  $\delta_r$

### 2.2.3. Posicionamento das formas e concretagem da aduela subsequente.

Com a contraflecha relativa é possível calcular a cota absoluta para posicionamento das formas. Para tanto, antes da concretagem de cada aduela deve-se seguir o seguinte procedimento:



# 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:



- Levantamento topográfico no fim das duas aduelas anteriores.
- Cálculo da cota projetada da aduela a ser concretada ( $P_{C3}$ ).
- Determinação da cota para posicionamento das formas  $P_d$  igual a cota projetada  $P_{C3}$  mais a contraflecha relativa  $\delta_r$ .
- Ajuste das cotas das formas e concretagem da aduela.

### 3. Aplicação

Trata-se do viaduto de concreto protendido ilustrado nas figuras 6 e 7. A obra tem dois vãos de 71m, é curva em planta com  $R = 100m$ , seção monocelular, construída em balanços sucessivos a partir do apoio central, com 15 aduelas mais um segmento de fechamento em cada vão.

Foram posicionados 4 pilares provisórios ao redor do apoio principal e um pilar provisório em cada vão para garantir a estabilidade durante a construção e que serão removidos ao terminar a obra.

O viaduto foi modelado em um programa de análise estrutural que permite simular a execução sucessiva das aduelas considerando a deformação lenta em todo o processo.

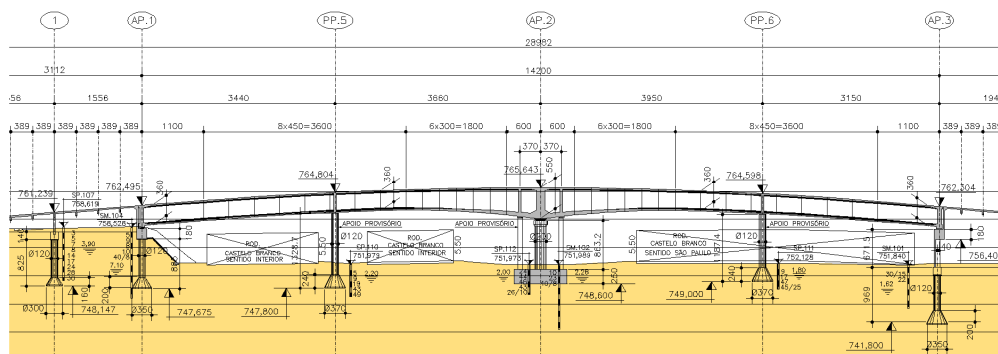
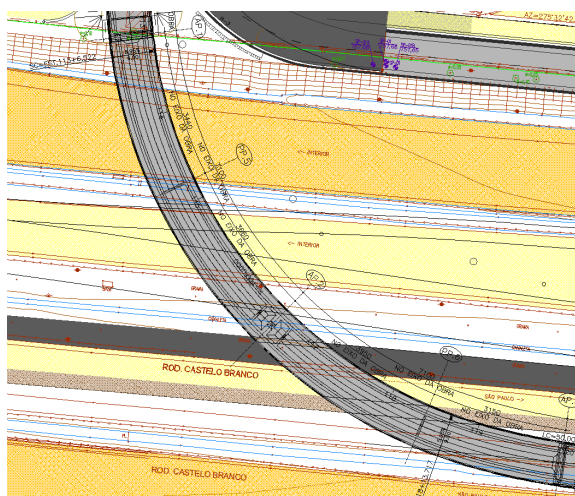
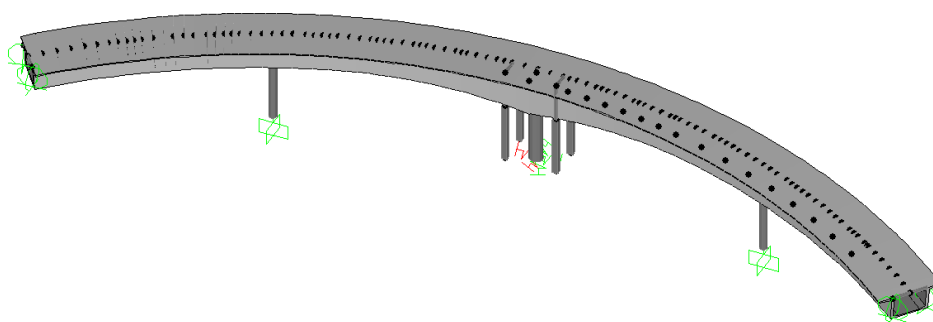


Figura 6 – Perfil Longitudinal do Viaduto Sobre a Rodovia Castelo Branco



**Figura 7 – Planta do Viaduto Sobre a Rodovia Castelo Branco**



**Figura 8 – Modelo de cálculo renderizado**

Os seguintes parâmetros foram adotados:

- Ciclo de 7 dias para execução das aduelas
- umidade relativa do ar: 70%
- $h_{fic} = 0,8m$
- $f_{ck} = 45MPa$

Além dos estágios construtivos correspondentes a cada aduela foram considerados: o estágio “remove” para simular a remoção dos pilares provisórios, o estágio para a aplicação da parcela adicional de carga permanente “ $g_2$ ” e o estágio final relativo a um tempo de 10.000dias, “t-inf”.

O diagrama das contraflechas verticais da extremidade de cada aduela executada, bem como, os diagramas de contraflechas das aduelas 5 e 11 com as cotas de forma das respectivas





# 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:



aduelas 6 e 12 são mostradas na Figura 9. A Tabela 1 contém as contraflechas verticais obtidas para todas as aduelas.

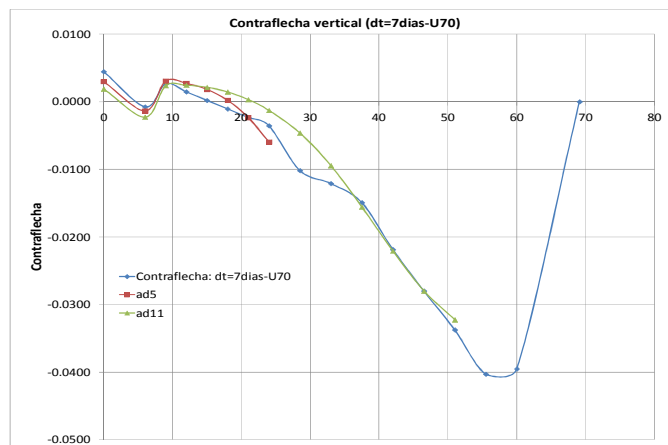


Figura 9 – Diagrama de contraflecha vertical

Tabela 1 – Contraflecha vertical

contraflechas no eixo do caixão (m) - valores positivos para cima																
	pontos = fim-início															
	ad-0-0	ad-0-1	ad-1-2	ad-2-3	ad-3-4	ad-4-5	ad-5-6	ad-6-7	ad-7-8	ad-8-9	ad-9-10	ad-10-11	ad-11-12	ad-12-13	ad-13-14	ad-14-15
ad0	0.0044	0.0037	0.0025													
ad1	0.0041	0.0036	0.0026	0.0009												
ad2	0.0038	0.0034	0.0028	0.0015	-0.0009											
ad3	0.0035	0.0033	0.0029	0.0020	0.0002	-0.0026										
ad4	0.0032	0.0032	0.0030	0.0024	0.0011	-0.0011	-0.0043									
ad5	0.0030	0.0031	0.0031	0.0027	0.0018	0.0002	-0.0023	-0.0059								
ad6	0.0028	0.0030	0.0031	0.0029	0.0024	0.0012	-0.0007	-0.0035	-0.0101							
ad7	0.0025	0.0027	0.0027	0.0025	0.0018	0.0006	-0.0014	-0.0041	-0.0102	-0.0196						
ad8	0.0023	0.0025	0.0027	0.0027	0.0024	0.0017	0.0004	-0.0014	-0.0055	-0.0121	-0.0212					
ad9	0.0020	0.0023	0.0026	0.0027	0.0025	0.0019	0.0010	-0.0004	-0.0035	-0.0084	-0.0149	-0.0223				
ad10	0.0019	0.0022	0.0024	0.0024	0.0022	0.0015	0.0004	-0.0011	-0.0043	-0.0091	-0.0152	-0.0218	-0.0283			
ad11	0.0019	0.0022	0.0024	0.0024	0.0022	0.0015	0.0003	-0.0013	-0.0046	-0.0094	-0.0155	-0.0220	-0.0280	-0.0322		
ad12	0.0019	0.0022	0.0025	0.0026	0.0024	0.0018	0.0007	-0.0009	-0.0044	-0.0095	-0.0160	-0.0230	-0.0294	-0.0337	-0.0348	
ad13	0.0020	0.0024	0.0028	0.0031	0.0030	0.0026	0.0016	0.0000	-0.0036	-0.0092	-0.0165	-0.0248	-0.0325	-0.0382	-0.0403	-0.0374
ad14	0.0020	0.0026	0.0031	0.0036	0.0037	0.0034	0.0025	0.0009	-0.0029	-0.0089	-0.0169	-0.0261	-0.0348	-0.0411	-0.0432	-0.0395
ad15	0.0012	0.0020	0.0030	0.0042	0.0056	0.0071	0.0086	0.0098	0.0110	0.0107	0.0087	0.0057	0.0019	-0.0022	-0.0056	-0.0076
remove	0.0034	0.0037	0.0044	0.0052	0.0062	0.0072	0.0083	0.0093	0.0102	0.0099	0.0081	0.0054	0.0020	-0.0017	-0.0049	-0.0067
g2	0.0024	0.0019	0.0016	0.0012	0.0007	0.0000	-0.0008	-0.0018	-0.0036	-0.0063	-0.0096	-0.0129	-0.0159	-0.0180	-0.0187	-0.0171
t-inf	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

A Tabela 2 contém as contraflechas rotacionais de todas as aduelas.

Tabela 2 – Contraflecha rotacional

contraflecha diferencial entre a alma externa e a alma interna do caixão (m) - valores negativos = alma interna mais alta																
	pontos = fim-início (aplicar metade da valor para cada alma [*])															
	ad-0-0	ad-0-1	ad-1-2	ad-2-3	ad-3-4	ad-4-5	ad-5-6	ad-6-7	ad-7-8	ad-8-9	ad-9-10	ad-10-11	ad-11-12	ad-12-13	ad-13-14	ad-14-15
ad0	-0.0453	-0.0457	-0.0456													
ad1	-0.0453	-0.0457	-0.0456	-0.0453												
ad2	-0.0453	-0.0457	-0.0456	-0.0452	-0.0445											
ad3	-0.0452	-0.0455	-0.0454	-0.0450	-0.0443	-0.0434										
ad4	-0.0449	-0.0453	-0.0451	-0.0447	-0.0440	-0.0430	-0.0417									
ad5	-0.0446	-0.0449	-0.0447	-0.0443	-0.0436	-0.0425	-0.0412	-0.0396								
ad6	-0.0441	-0.0444	-0.0442	-0.0438	-0.0430	-0.0419	-0.0406	-0.0390	-0.0363							
ad7	-0.0432	-0.0434	-0.0432	-0.0427	-0.0419	-0.0408	-0.0394	-0.0378	-0.0351	-0.0326						
ad8	-0.0418	-0.0420	-0.0417	-0.0411	-0.0402	-0.0391	-0.0376	-0.0359	-0.0331	-0.0304	-0.0280					
ad9	-0.0400	-0.0401	-0.0397	-0.0390	-0.0380	-0.0368	-0.0353	-0.0335	-0.0306	-0.0278	-0.0252	-0.0230				
ad10	-0.0386	-0.0386	-0.0381	-0.0374	-0.0363	-0.0350	-0.0335	-0.0317	-0.0287	-0.0259	-0.0233	-0.0210	-0.0191			
ad11	-0.0371	-0.0371	-0.0365	-0.0356	-0.0345	-0.0331	-0.0314	-0.0296	-0.0265	-0.0236	-0.0210	-0.0187	-0.0168	-0.0152		
ad12	-0.0355	-0.0354	-0.0347	-0.0337	-0.0324	-0.0309	-0.0291	-0.0271	-0.0239	-0.0209	-0.0182	-0.0159	-0.0140	-0.0124	-0.0113	
ad13	-0.0337	-0.0335	-0.0326	-0.0315	-0.0300	-0.0283	-0.0264	-0.0242	-0.0208	-0.0176	-0.0148	-0.0125	-0.0106	-0.0091	-0.0080	-0.0071
ad14	-0.0307	-0.0303	-0.0292	-0.0278	-0.0261	-0.0241	-0.0219	-0.0195	-0.0157	-0.0123	-0.0093	-0.0069	-0.0050	-0.0035	-0.0023	-0.0014
ad15	-0.0355	-0.0353	-0.0346	-0.0335	-0.0322	-0.0306	-0.0287	-0.0265	-0.0230	-0.0196	-0.0163	-0.0133	-0.0106	-0.0082	-0.0060	-0.0041
remove	-0.0158	-0.0159	-0.0157	-0.0153	-0.0147	-0.0139	-0.0129	-0.0117	-0.0097	-0.0078	-0.0060	-0.0044	-0.0031	-0.0020	-0.0012	-0.0007
g2	-0.0139	-0.0140	-0.0139	-0.0137	-0.0133	-0.0127	-0.0120	-0.0111	-0.0097	-0.0083	-0.0069	-0.0056	-0.0044	-0.0033	-0.0024	-0.0016
t-inf	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

As contraflechas na obra são definidas aduela por aduela.



# 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 seguir, na figura 10, são apresentados valores relativos à contraflecha vertical da aduela 2.

COTA B	COTA LEVANTADA EM CAMPO (m)		TAMANHO DA ADUELA (m)			COTA PROJETADA CAMPO (Pc2)	COTA DE PROJETO (m)	CONTRAFLECHA VERTICAL (m)	COTA DE POSICIONAMENTO DA FORMA (Pc1)	CONTRAFLECHA RELATIVA ( $\delta_r$ )
	PartidaE	1E	PartidaE	1E	2E	2E	2E	2E	2E	2E
COTA B	765,657	765,638	6,000	3,000	3,000	765,619	765,562	0,0009	765,563	-0,056
COTA B	PartidaD		PartidaD			2D	2D	2D	2D	2D
	1D	1D	1D	1D	2D	2D	2D	2D	2D	2D
COTA B	765,649	765,616	6,000	3,000	3,000	765,583	765,543	0,0009	765,544	-0,039

**Figura 10 – Contraflecha vertical da aduela 2**

As contraflechas rotacionais são determinadas de maneira análoga através das cotas verticais das almas da seção transversal e devem ser utilizadas para controle das bordas da obra (Cota A e Cota C).

## 4. Comentários

Observa-se que as contraflechas verticais são essencialmente negativas, ou seja, para baixo do greide do viaduto atingindo valores da ordem de 40mm.

As rotações das seções sofrem incrementos significativos no estágio correspondente à remoção dos pilares provisórios e no estágio final devido ao efeito da deformação lenta. Nota-se, também, que essas contraflechas levam sempre a posicionamento mais elevado da borda interna da seção atingindo valores diferenciais da ordem de 46mm e são maiores junto ao apoio principal do viaduto.

Esta obra ainda não foi finalizada. A aplicação do método em outras pontes tem sido bem sucedida no controle das flechas.

## 5. Bibliografia

- OYAMADA, R. N, Controle de flecha e adaptação por fluência em pontes construídas pelo método dos balanços sucessivos, São Paulo. Tese de Doutorado POLI-USP. 2004.
- MATHIVAT, J. Construcción de puentes de hormigon pretensado por voladizos sucesivos. Editores Técnicos Asociados, S. A, 1980.
- POLDONY, W. e MULLER, J. M. Construction and design of prestresses concrete segmental bridges, John Wiley & Sons, 1982.