



**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS

# **Pontes de múltiplos vãos em balanços sucessivos na Rodovia Castelo Branco**

**Eng<sup>o</sup> Rui Oyamada**

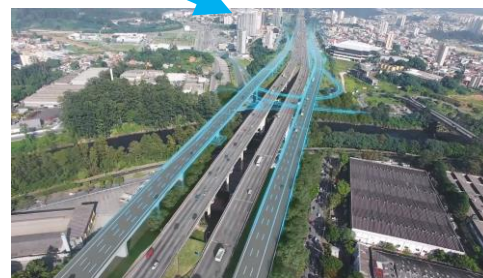
## **PROPÓSITOS:**

- **Apresentação das seguintes OAEs:**
  - **Guilherme de Almeida;**
  - **Fuad Auada;**
  - **Av. Tucunaré.**
- **Metodologia construtiva;**
- **Controle de flechas de pontes construídas pelo método dos balanços sucessivos.**



III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas

10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS

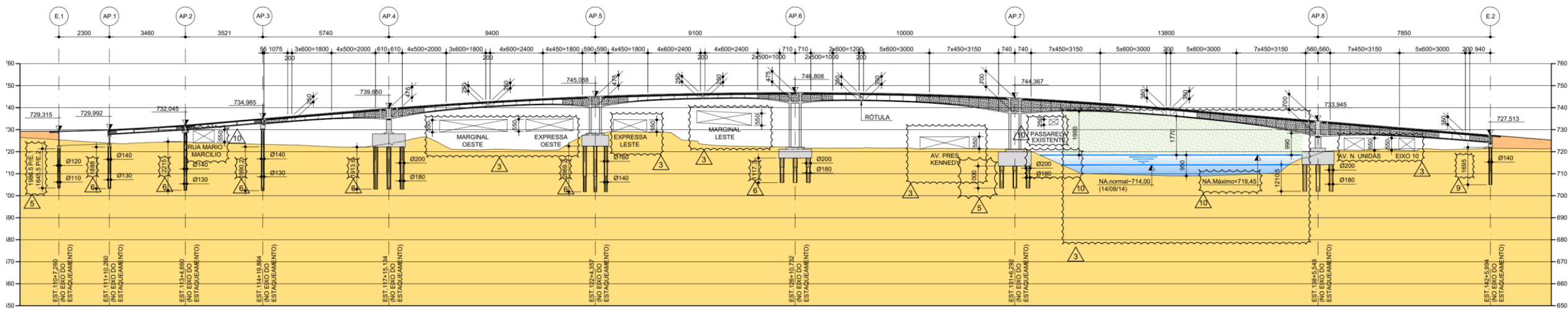






## • Fuad Auada

CORTE LONGITUDINAL NO EIXO DA OBRA



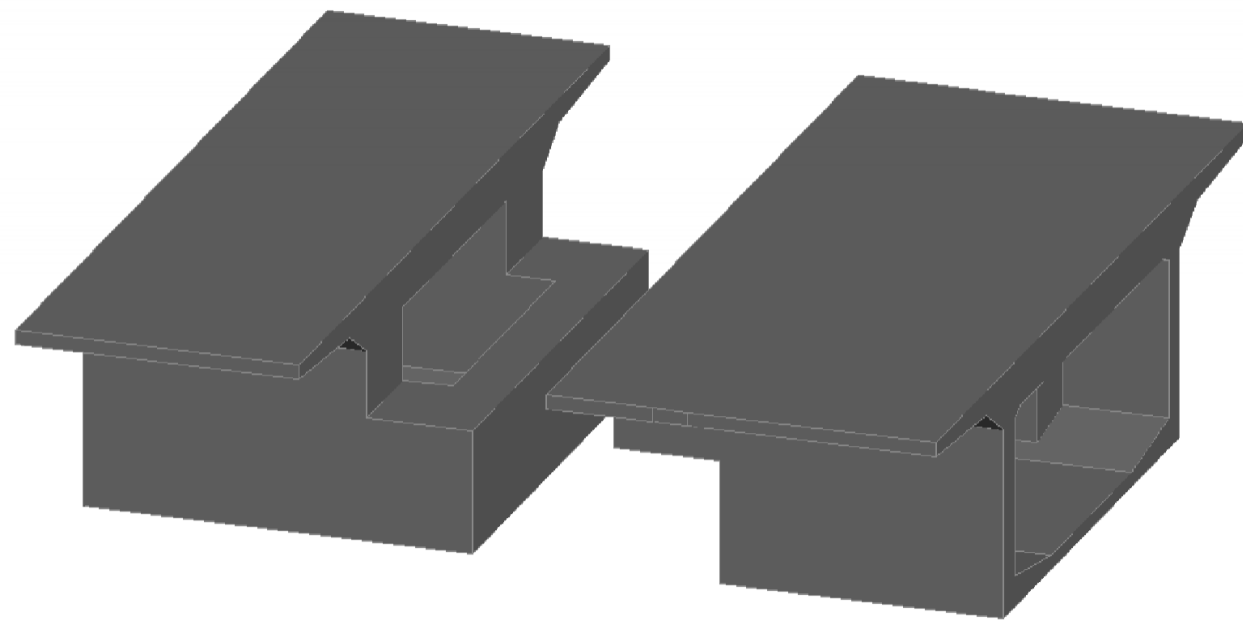
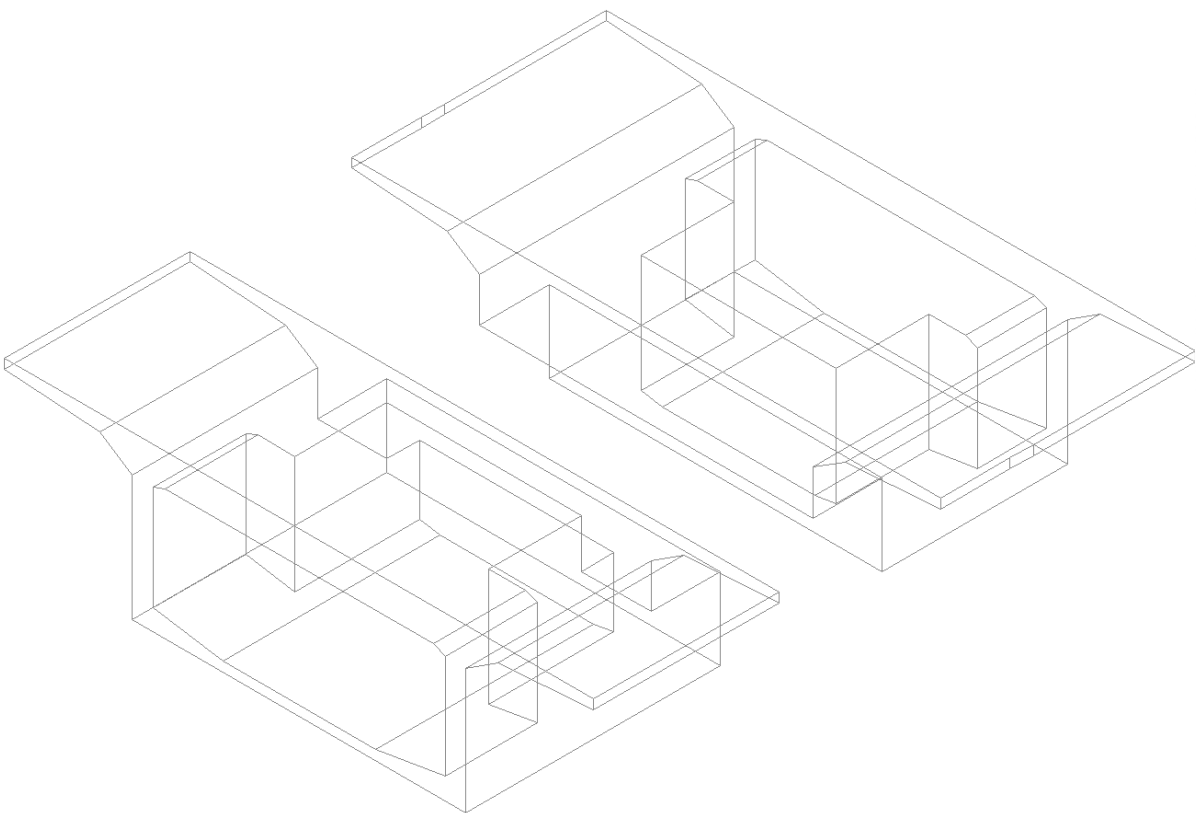
### Dados gerais

Vãos: 23 (EL) – 35 (VP) – 35 (VP) – 57,40 (BS) - 94 (BS) - 91 (BS) -  
100 (BS) - 138 (BS) – 78,50 (BS)

### Fundações

EL : 2Ø120/Ø110 (E.1)  
VP: 2Ø140/Ø130 (AP.1 – AP.2 – AP.3)  
BS: 9Ø200/Ø180 (AP.4)  
BS: 12Ø160/Ø140 (AP.5)  
BS: 9Ø200/Ø180 (AP.6)  
BS: 12Ø200/Ø180 (AP.7)  
BS: 12Ø200/Ø180 (AP.8)  
BS: 2Ø140 (E.2)

- Fuad Auada

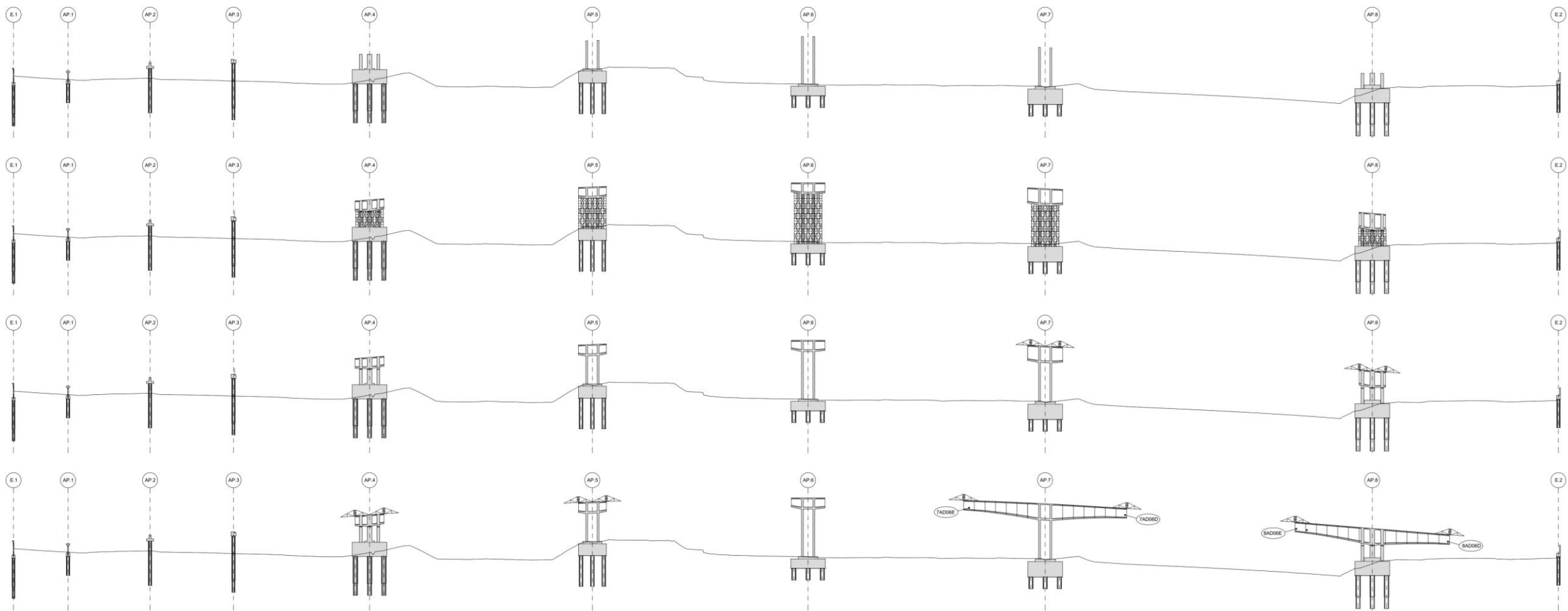






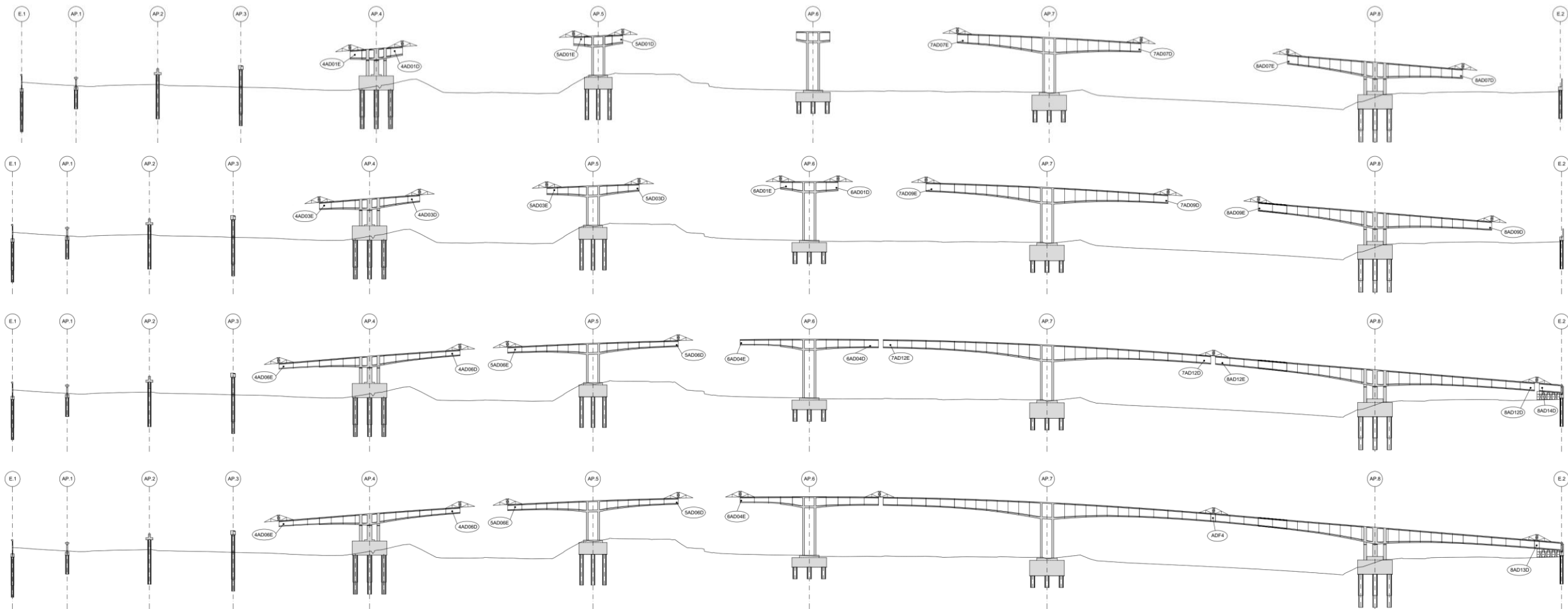
# III Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas

10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS



# III Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas

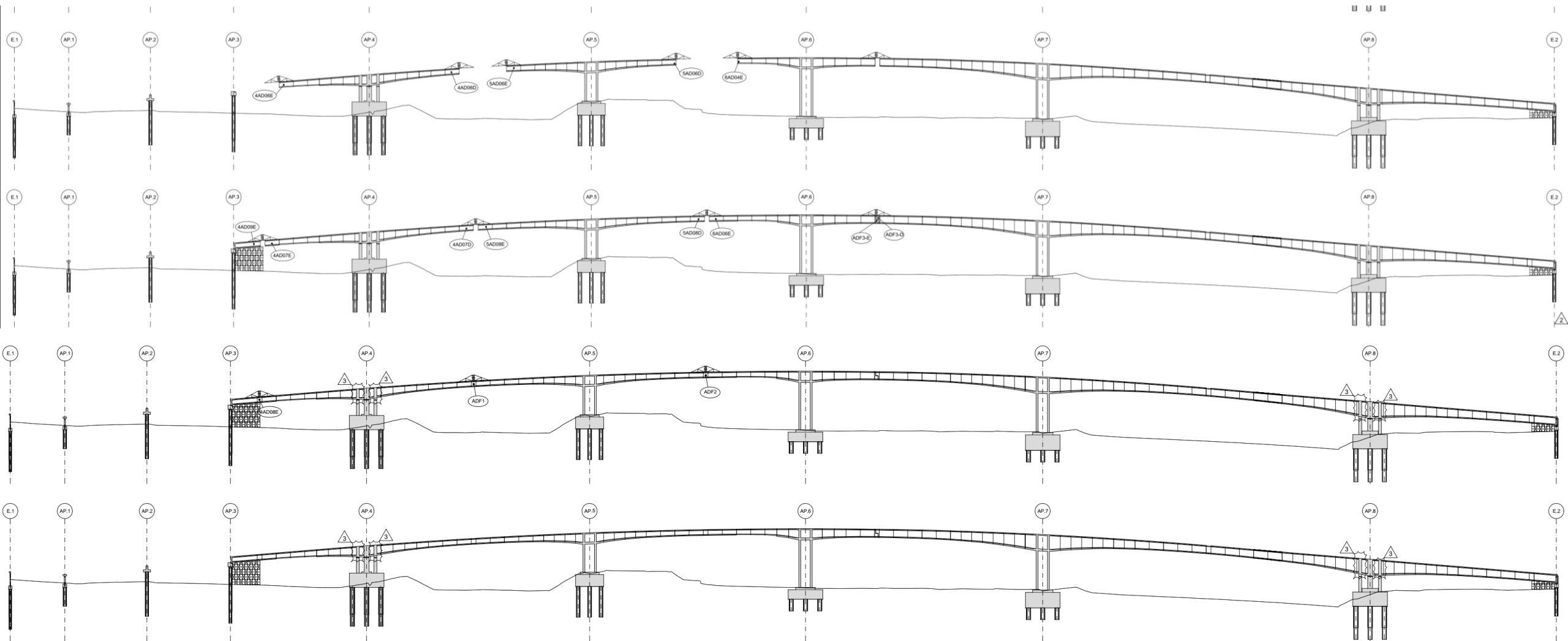
10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS





# III Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas

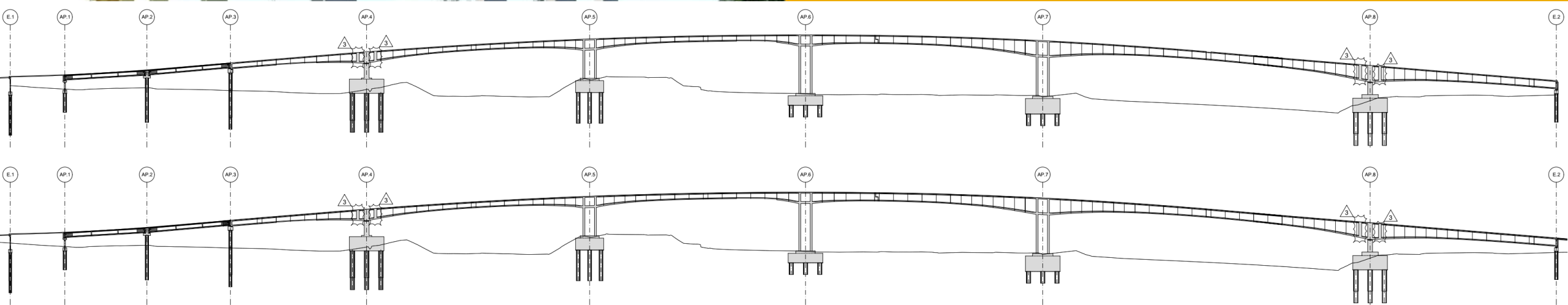
10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS





**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

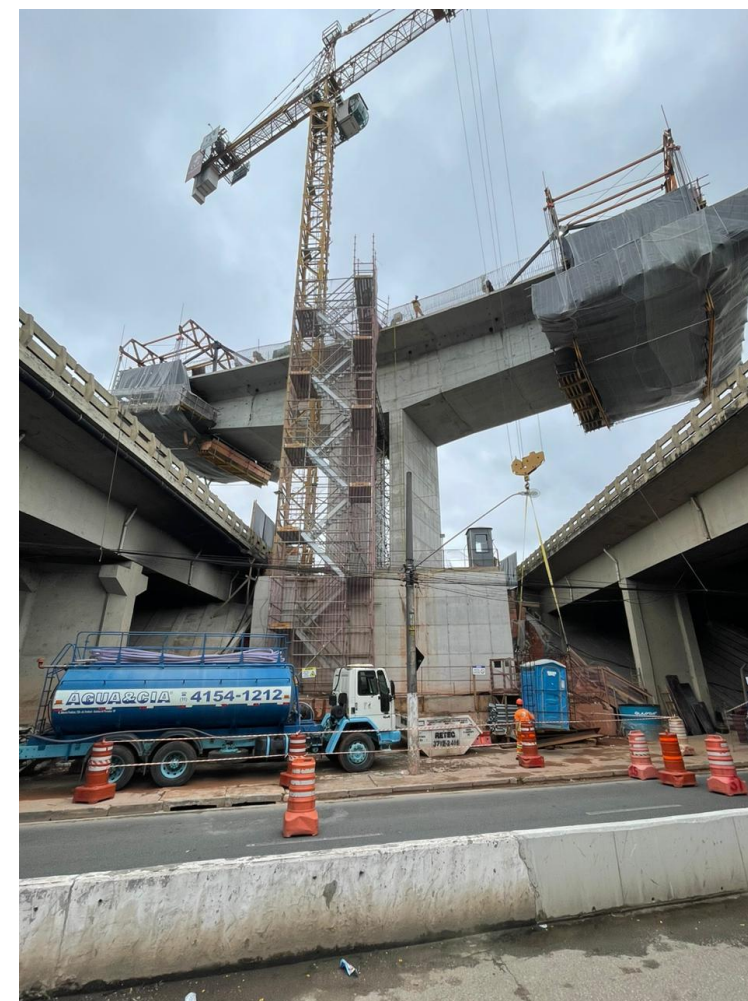
10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS





**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

**10 de novembro  
PUCRS  
Porto Alegre - RS**





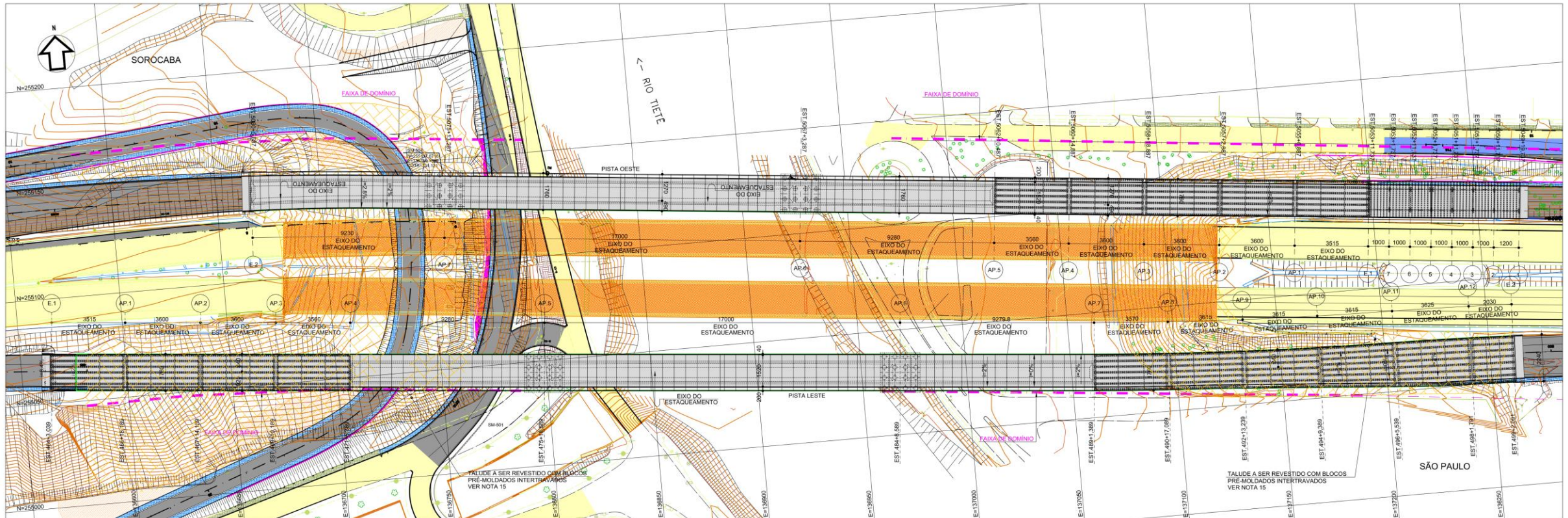
**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

**10 de novembro  
PUCRS**  
Porto Alegre - RS



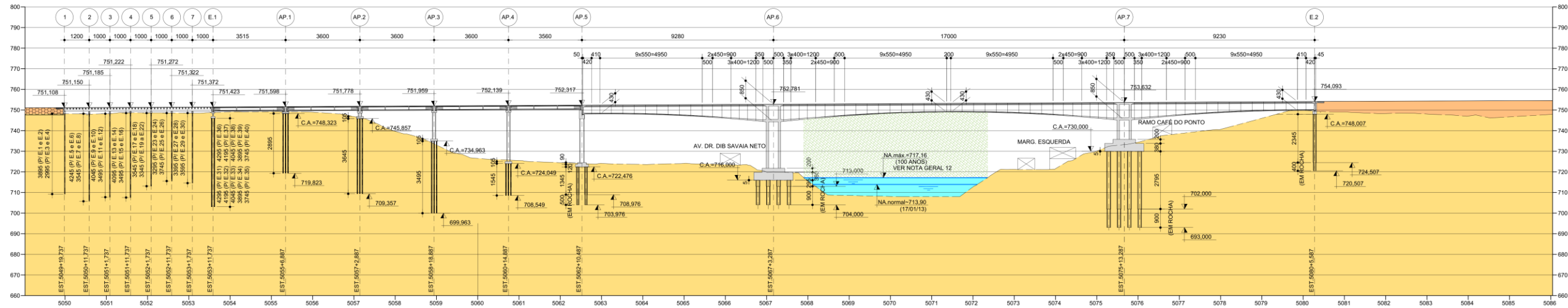


• Guilherme de Almeida

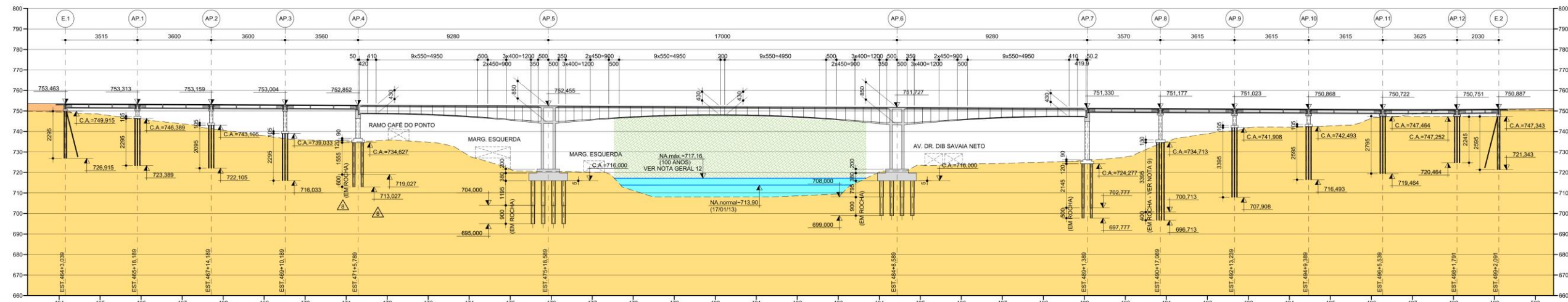




CORTE LONGITUDINAL NO EIXO DO ESTAQUEAMENTO - PISTA OESTE



CORTE LONGITUDINAL NO EIXO DO ESTAQUEAMENTO - PISTA LESTE  
ESC. 1:1000





**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

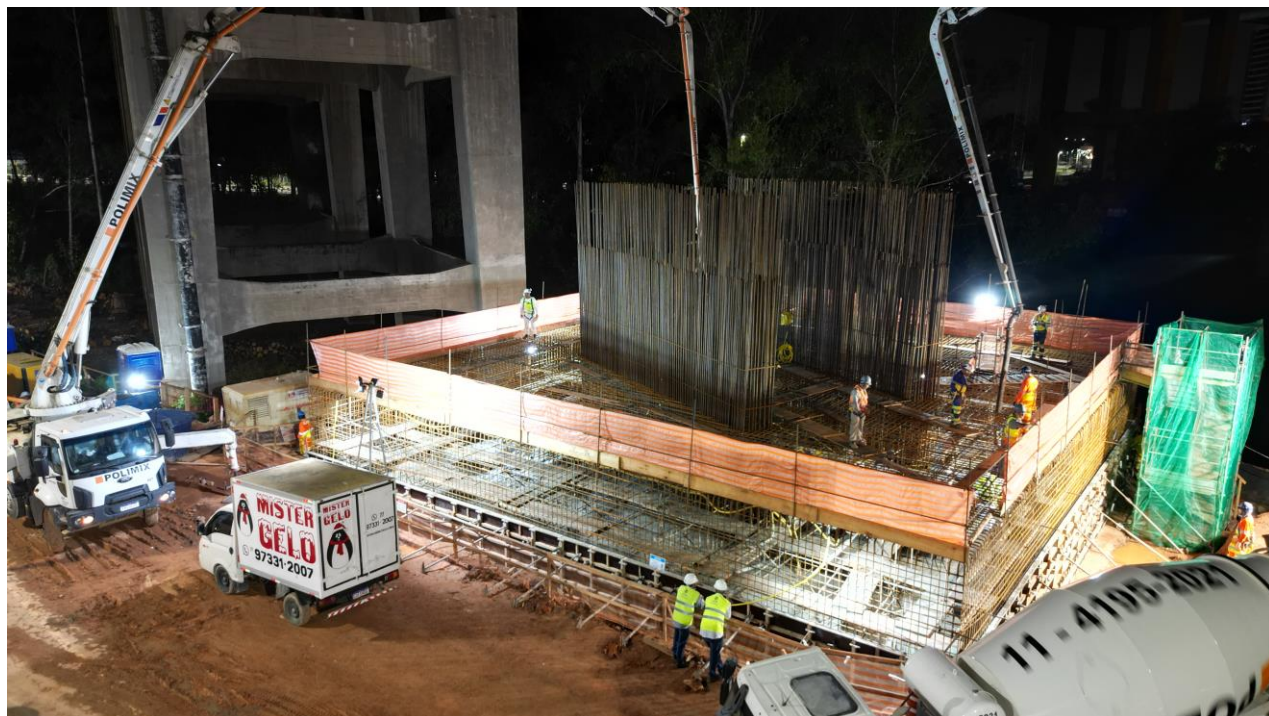
**10 de novembro  
PUCRS**  
Porto Alegre - RS





# III Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas

10 de novembro  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS



## FUNDAÇÕES

- **PISTA LESTE**

- ESTACA RAIZ DE Ø41cm – 182 und
- ESTACÃO DE Ø140cm – 16 und
- ESTACÃO DE Ø200cm – 32 und

- **PISTA OESTE**

- ESTACA RAIZ DE Ø41cm – 82 und
- ESTACÃO DE Ø140cm – 8 und
- ESTACÃO DE Ø160cm – 5 und
- ESTACÃO DE Ø200cm – 32 und



## BLOCOS

- **PISTA LESTE – 12 APOIOS**

- BLOCO (1900x1900x580)cm – 2 und
- BLOCO (640x640x210)cm – 4 und
- BLOCO (460x340x130)cm – 2 und
- BLOCO (340x340x130)cm – 11 und

- **PISTA OESTE – 7 APOIOS**

- BLOCO (1900x1900x580)cm – 2 und
- BLOCO (640x640x210)cm – 2 und
- BLOCO (340x340x130)cm – 11 und

## PILARES

- **PISTA LESTE**

- PILARES (170x150xVar. cm) – 13 und
- PILARES (220x150xVar. cm) – 4 und
- PILARES (962x120x Var. cm) – 4 und

- **PISTA OESTE**

- PILARES (170x150xVar. cm) – 7 und
- PILARES (220x150xVar. cm) – 2 und
- PILARES (962x120x Var. cm) – 4 und



## TRAVESSAS E ENCONTROS

- **PISTA LESTE**

- TRAVESSA – 10 und
- ENCONTRO – 2 und

- **PISTA OESTE**

- TRAVESSA – 5 und
- ENCONTRO – 2 und

## VIGAS ISOSTÁTICAS

- **PISTA LESTE**

- VIGA LONGARINA (34,90m x 1,95m) – 65 und
- VIGA LONGARINA (19,90m x 1,95m) – 8 und

- **PISTA OESTE**

- VIGA LONGARINA (34,90m x 1,95m) – 35 und



## DISTRIBUIÇÃO DOS VÃOS DA PONTE

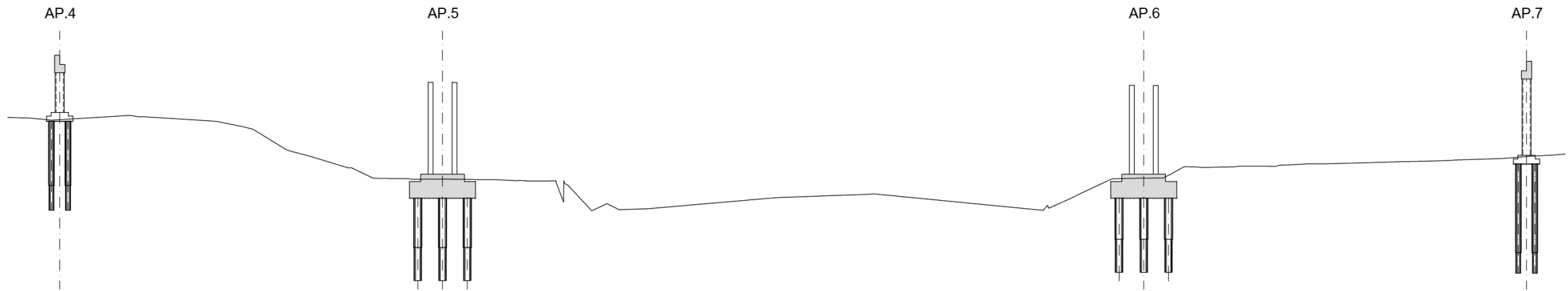
### • PISTA LESTE

- 1 VÃO VIGAS LONGARINAS 35,15m
- 2 VÃOS VIGAS LONGARINAS 36,00m
- 1 VÃO VIGAS LONGARINAS 35,60m
- 1 VÃO VIGAS LONGARINAS 35,70m
- 3 VÃOS VIGAS LONGARINAS 36,15m
- 1 VÃO VIGAS LONGARINAS 36,25m
- 1 VÃO VIGAS LONGARINAS 20,30m
- 2 VÃOS 92,80m – BALANÇO SUCESSIVO
- 1 VÃO 170,00m – BALANÇO SUCESSIVO

### • PISTA OESTE

- 1 VÃO 35,15m
- 3 VÃOS 36,00m
- 1 VÃO 35,60m
- 1 VÃO 92,80m – BALANÇO SUCESSIVO
- 1 VÃO 170,00m – BALANÇO SUCESSIVO
- 1 VÃO 92,30m – BALANÇO SUCESSIVO

## EXECUÇÃO DAS FUNDAÇÕES E PILARES



## EXECUÇÃO DA ADUELA DE PARTIDA SOBRE CIMBRAMENTO

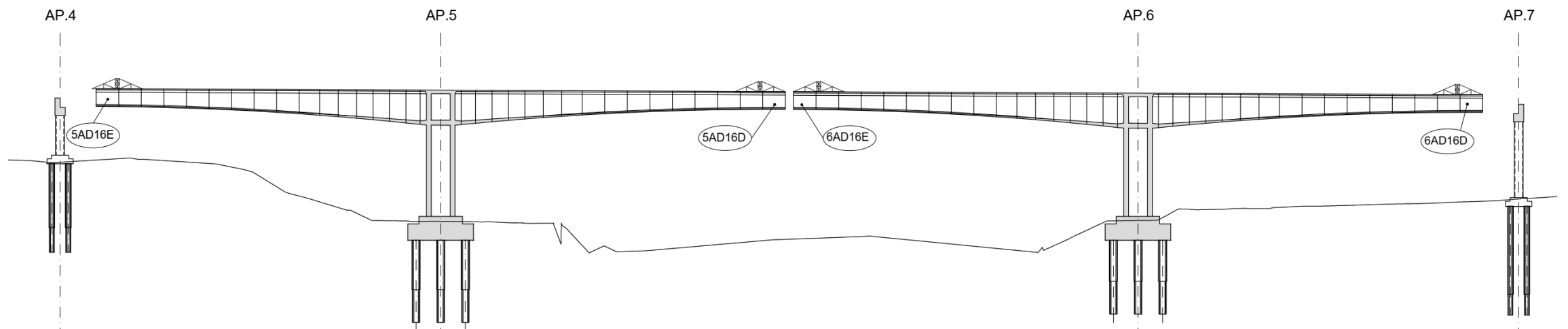




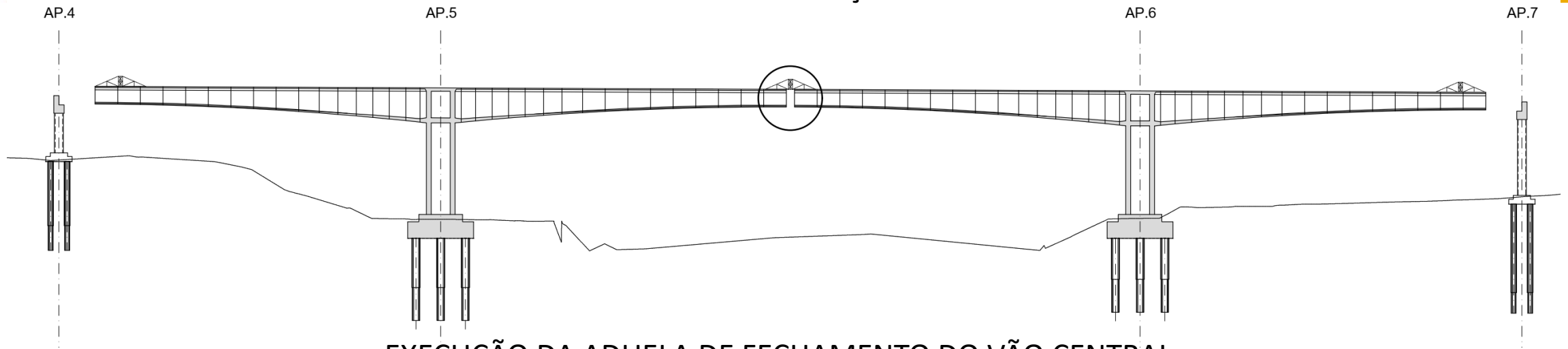
MONTAGEM DA TRELIÇA PARA BALANÇOS SUCESSIVOS



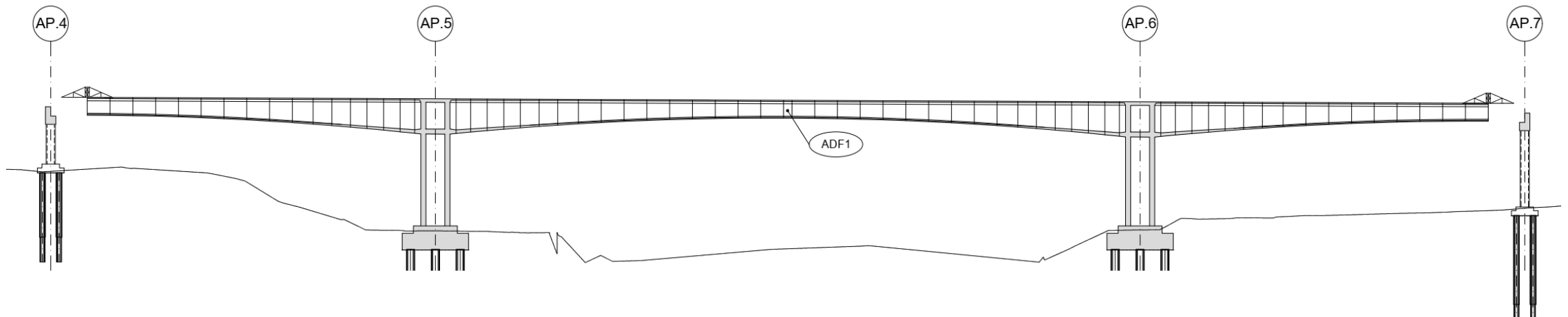
EXECUÇÃO DAS ADUELAS EM BALANÇOS SUCESSIVOS



POSICIONAMENTO DA TRELIÇA NO VÃO CENTRAL

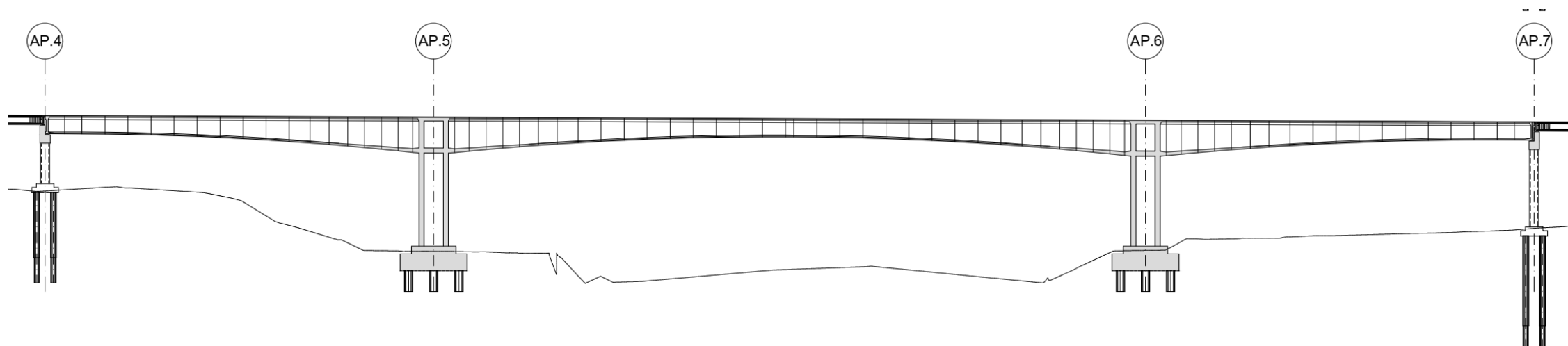


EXECUÇÃO DA ADUELA DE FECHAMENTO DO VÃO CENTRAL





EXECUÇÃO DOS GUARDA RODAS, PAVIMENTO, JUNTA DE DILATAÇÃO E SINALIZAÇÃO



## DEFORMAÇÕES PROGRESSIVAS

Fluência do concreto

1- Hipótese da linearidade

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_{c0}}{E_{c28}} \phi(t, t_0)$$

2- Hipótese da superposição

Para acréscimo de tensão

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{1}{E_{c28}} \left[ \sigma_{c0} \phi(t, t_0) + \sum \Delta \sigma_{ci} \phi(t, t_i) \right]$$



## FLUÊNCIA PELA NBR-6118

$$\varepsilon_{c,\text{total}} = \varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \cdot (1 + \phi)$$

$$\phi = \phi_a + \phi_f + \phi_d$$

onde:

$\phi_f$  = coeficiente de fluência rápida irreversível;

$\phi_a$  = coeficiente de deformação lenta irreversível;

$\phi_d$  = coeficiente de deformação lenta reversível.

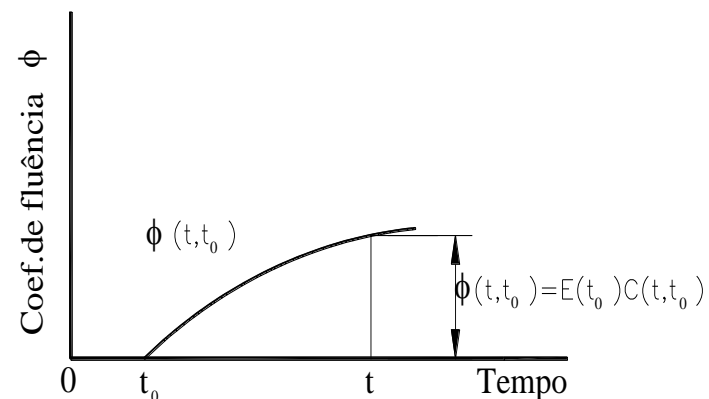


Fig.3.2. Coeficiente de fluência

## RETRAÇÃO DO CONCRETO

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

onde:

$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \times \varepsilon_{2s}$  é o valor final da retração

## RELAXAÇÃO DO AÇO

$$\Psi(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\sigma_{pi}}$$

$$\Psi(t, t_0) = \Psi_{1000} \left( \frac{t - t_0}{1000} \right)^{0,15}$$



## PERDAS IMEDIATAS DA FORÇA DE PROTENSÃO

- Encurtamento imediato do concreto
- Atrito entre as armaduras e as bainhas

$$\Delta P(x) = P_i \left[ 1 - e^{-\left(\mu \sum \alpha + kx\right)} \right]$$

- Acomodação dos cabos nas ancoragens

## PERDAS PROGRESSIVAS NA FASE ISOSTÁTICA

Para um elemento de concreto com uma única fase de protensão

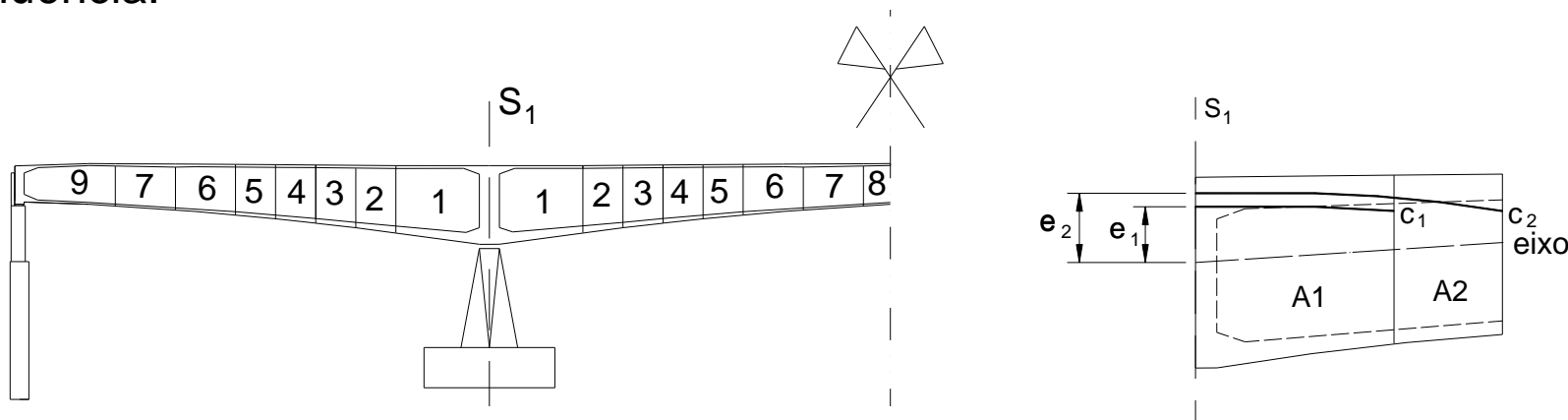
Processo simplificado

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}(t, t_0)E_p - \alpha_p \sigma_{c,pog} \phi(t, t_0) - \sigma_{p0} \chi(t, t_0)}{\chi_p + \chi_c \alpha_p \eta \rho_p}$$

## PERDAS PROGRESSIVAS NA FASE ISOSTÁTICA

As pontes construídas por balanços sucessivos estão sujeitas a mais de um carregamento, em diferentes datas, com diferentes módulos de elasticidade do concreto.

Cada conjunto de cabos ao ser protendido solicita as aduelas já executadas em condições diferentes de módulos de elasticidade e de coeficiente de fluência.





## PERDAS PROGRESSIVAS NA FASE ISOSTÁTICA

Para o 1º CICLO

- Concretagem da aduela 1

$$\sigma_{gt1,1}^1 = \frac{M_{gt1}^1}{W_1}$$

- Protensão do cabo equivalente 1

$$\sigma_{p1,1}^1 = - \left( \frac{P_{1,1}^1}{A_1} + \frac{P_{1,1}^1 \cdot e_1}{W_1} \right)$$

## PERDAS PROGRESSIVAS NA FASE ISOSTÁTICA

Para o 2º CICLO

- Concretagem da aduela 2

$$\sigma_{gt1,2}^1 = \frac{M_{gt2}^1}{W_1}$$

$$\sigma_{gt2,2}^1 = \frac{M_{gt2}^1}{W_2}$$

## PERDAS PROGRESSIVAS NA FASE ISOSTÁTICA

### Para o 2º CICLO

- Protensão do cabo equivalente 2

$$\sigma_{p2,2}^1 = - \left( \frac{P_{2,2}^1}{A_1} + \frac{P_{2,2}^1 \cdot e_2}{W_2} \right)$$

força no cabo 1 no 2º ciclo

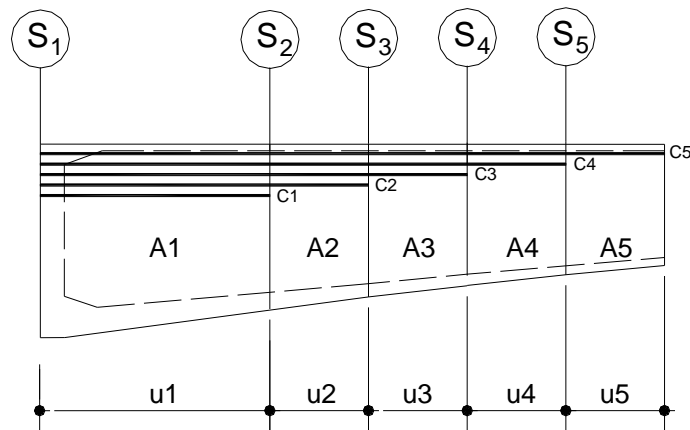
$$P_{1,2}^1 = P_{1,1}^1 + \Delta P_{1,2}^1$$

$$\Delta P_{1,2}^1 = \Delta \varepsilon_{1,2} E_p A_p - 0,83 \sigma_{p1,0} \psi_{1,2} A_p$$

$$\Delta \varepsilon_{1,2} = \frac{\sigma_{gt1,1}^1 + \sigma_{p1,1}^1}{E_{c28}} \phi_{1,2} + \varepsilon_{cs1,2} + \frac{\Delta \sigma_{p1,2}^1 + \sigma_{gt1,2}^1}{E_{c7}}$$

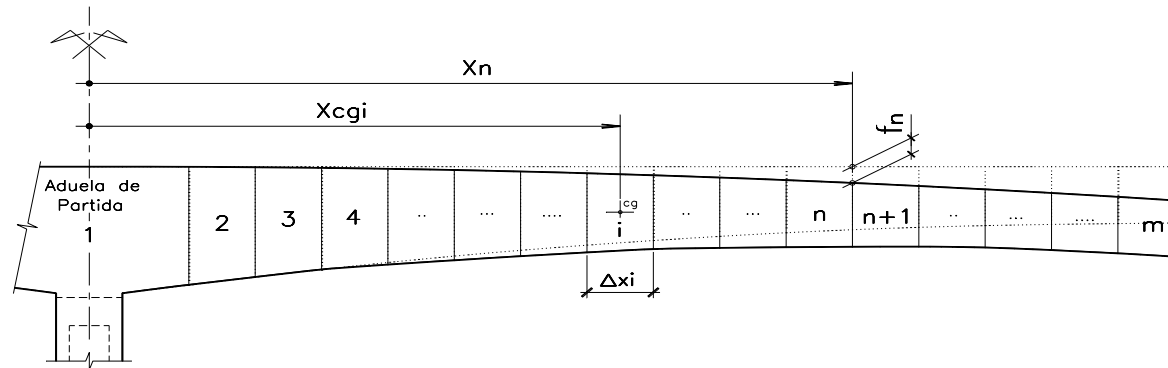


## PERDAS PROGRESSIVAS NA FASE ISOSTÁTICA



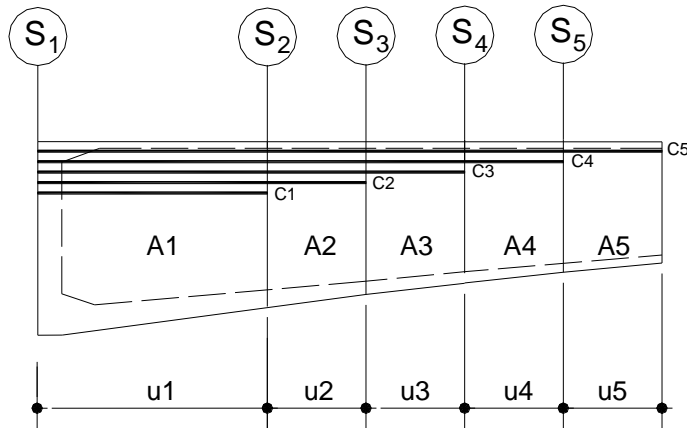
Seção	S1	S2	S3	S4	S5
Cabo					
C1	P <sub>1,5</sub> <sup>1</sup>				
C2	P <sub>2,5</sub> <sup>1</sup>	P <sub>2,5</sub> <sup>2</sup>			
C3	P <sub>3,5</sub> <sup>1</sup>	P <sub>3,5</sub> <sup>2</sup>	P <sub>3,5</sub> <sup>3</sup>		
C4	P <sub>4,5</sub> <sup>1</sup>	P <sub>4,5</sub> <sup>2</sup>	P <sub>4,5</sub> <sup>3</sup>	P <sub>4,5</sub> <sup>4</sup>	
C5	P <sub>5,5</sub> <sup>1</sup>	P <sub>5,5</sub> <sup>2</sup>	P <sub>5,5</sub> <sup>3</sup>	P <sub>5,5</sub> <sup>4</sup>	P <sub>5,5</sub> <sup>5</sup>

## CÁLCULO DAS FLECHAS



$$f^n = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{X_n - X_{cgi}}{I_i} \Delta X_i \left( \sum_{j=1}^m \frac{M_j^i}{E_{j-i+1}} \left( 1 + \phi_{j-i+1} \frac{E_{j-i+1}}{E_{c28}} \right) \right) \right]$$

## CÁLCULO DAS FLECHAS



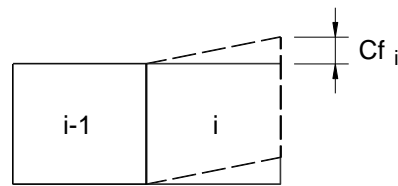
Ciclo	1º	2º	3º	4º	5º
Atuela					
A1	$f_1^1$	$f_2^1$	$f_3^1$	$f_4^1$	$f_5^1$
A2		$f_2^2$	$f_3^2$	$f_4^2$	$f_5^2$
A3			$f_3^3$	$f_4^3$	$f_5^3$
A4				$f_4^4$	$f_5^4$
A5					$f_5^5$



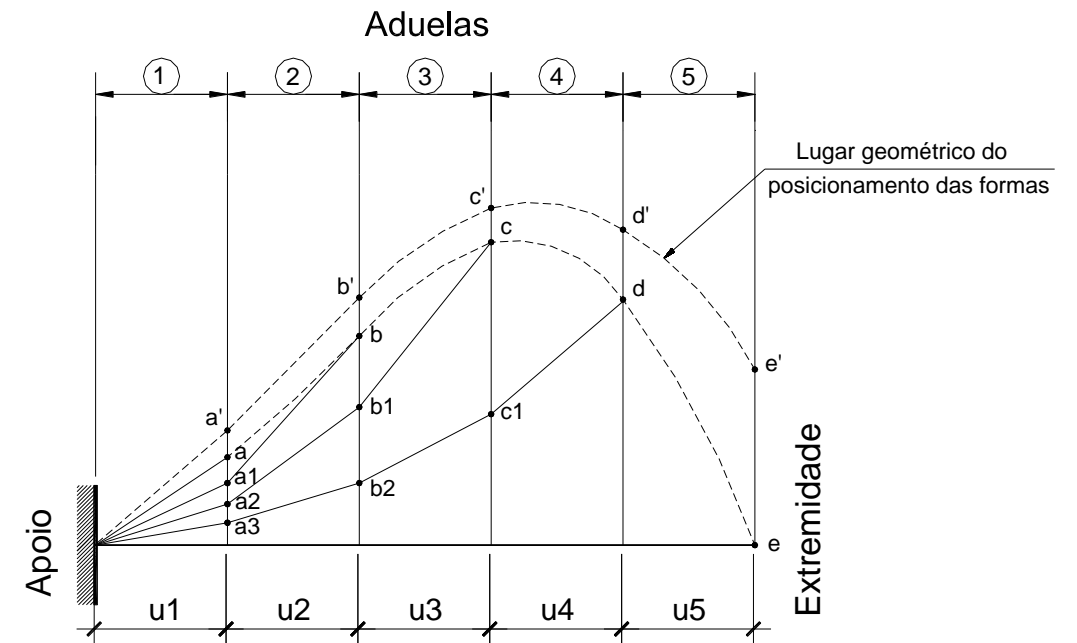
## CÁLCULO DAS FLECHAS

Contra-flechas relativas

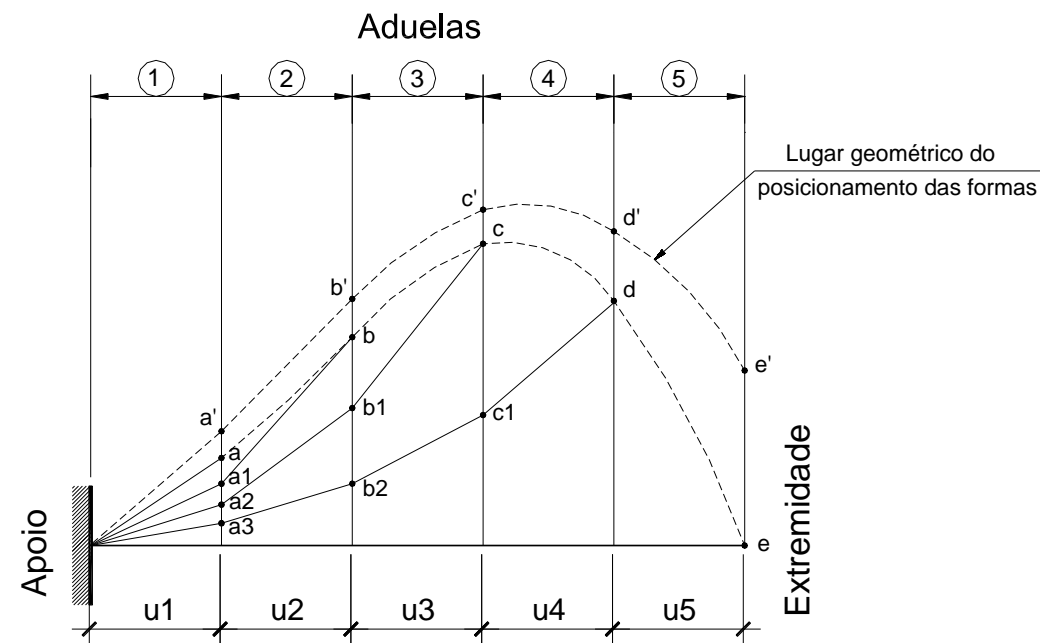
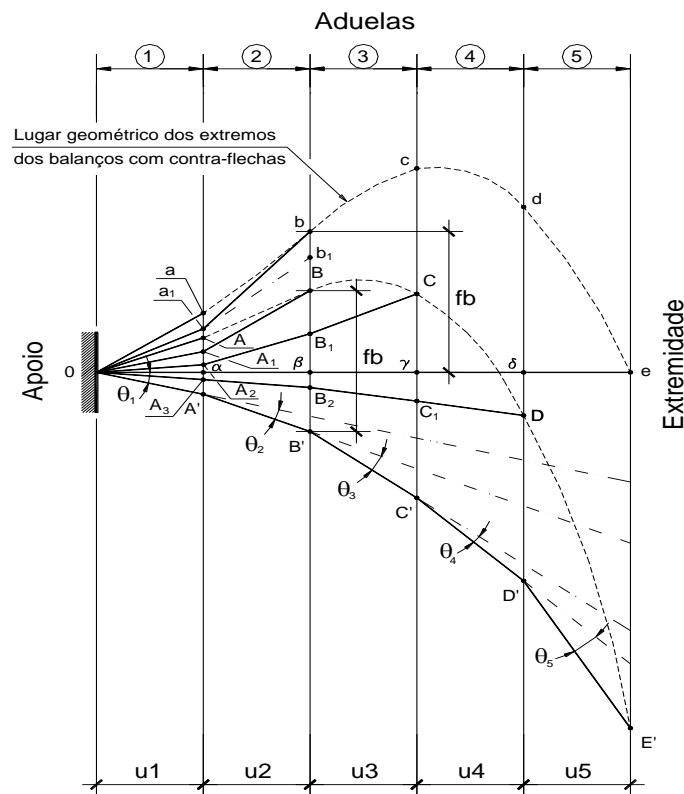
$$cf_i = \theta_i u_i$$



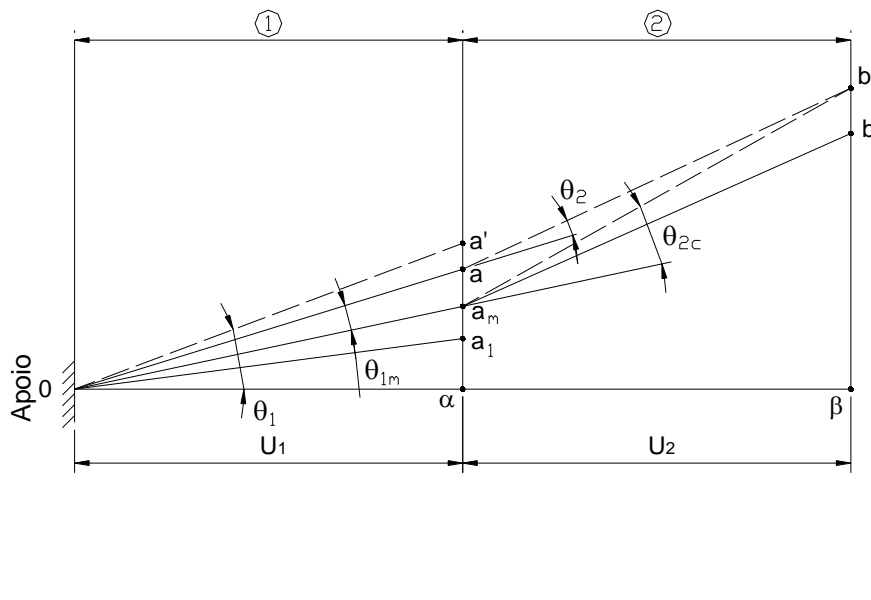
Contra-flechas absolutas



## FLECHAS E CONTRA-FLECHAS DAS ADUELAS



## CONTROLE DAS FLECHAS



- a) Se  $a_m = a$ , serão mantidas as contra-flechas calculadas.

$$cf_2 = \theta_2 u_2$$

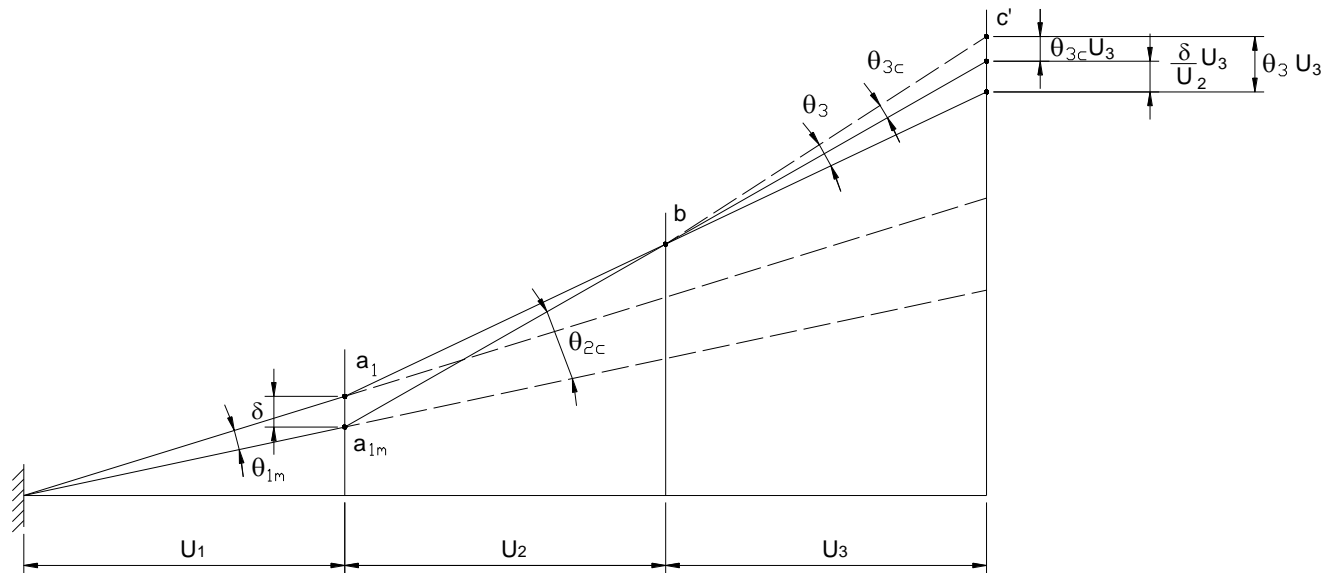
- b) Se  $a_m \neq a$ , as contra-flechas deverão ser corrigidas.

Caso a diferença seja pequena a correção será efetuada na aduela subsequente.

$$\theta_{2c} = \frac{\theta_2 u_2 + \theta_{1m} (u_1 + u_2)}{u_2} \quad cf_2 = \theta_{2c} u_2$$



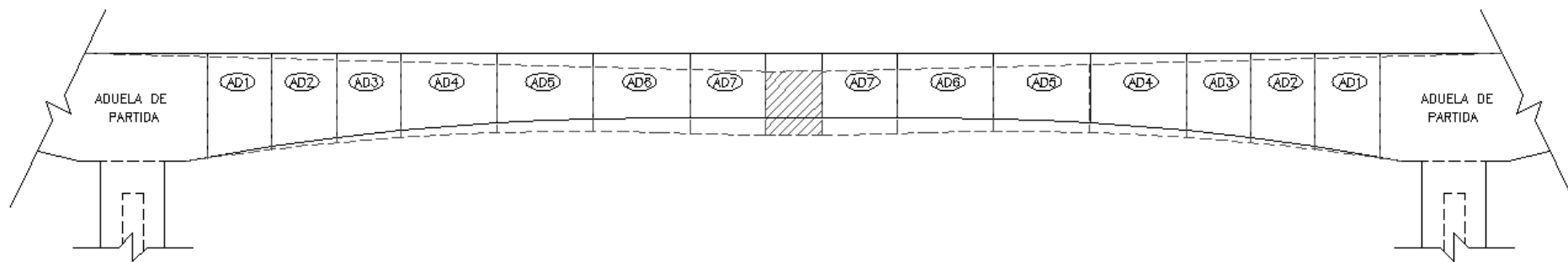
## CONTROLE DAS FLECHAS



$$\theta_{3c} = \theta_3 - \theta_{1m} \frac{u_1}{u_2}$$

$$cf_3 = \theta_{3c} u_3$$

## CONTROLE DAS FLECHAS



## **DETERMINAÇÃO DAS CONTRAFLECHAS**

Deformação Lenta – Fluência e Retração do Concreto

Duração do Ciclo de Execução das Aduelas

Evolução do Módulo de Elasticidade do Concreto

Relaxação da Armadura Protendida

Gradiente de Temperatura

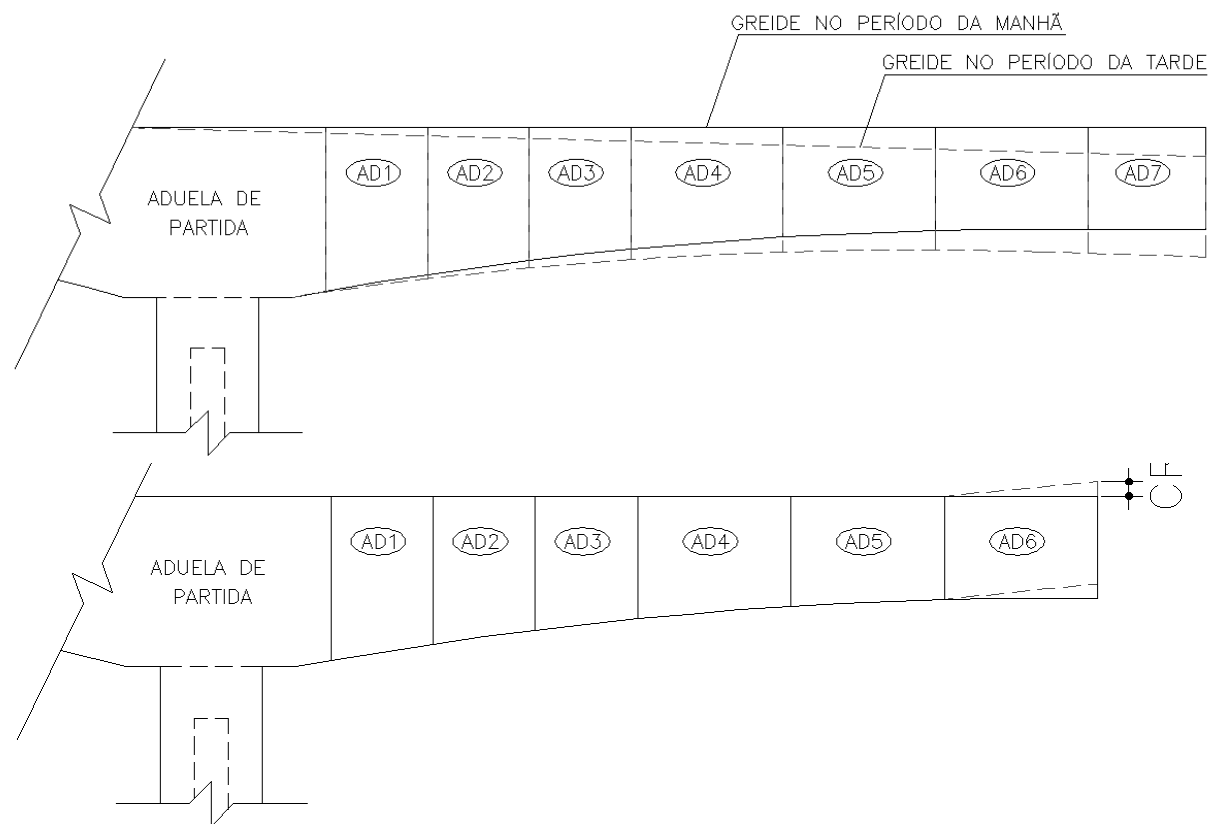


## **DETERMINAÇÃO DAS CONTRAFLECHAS**

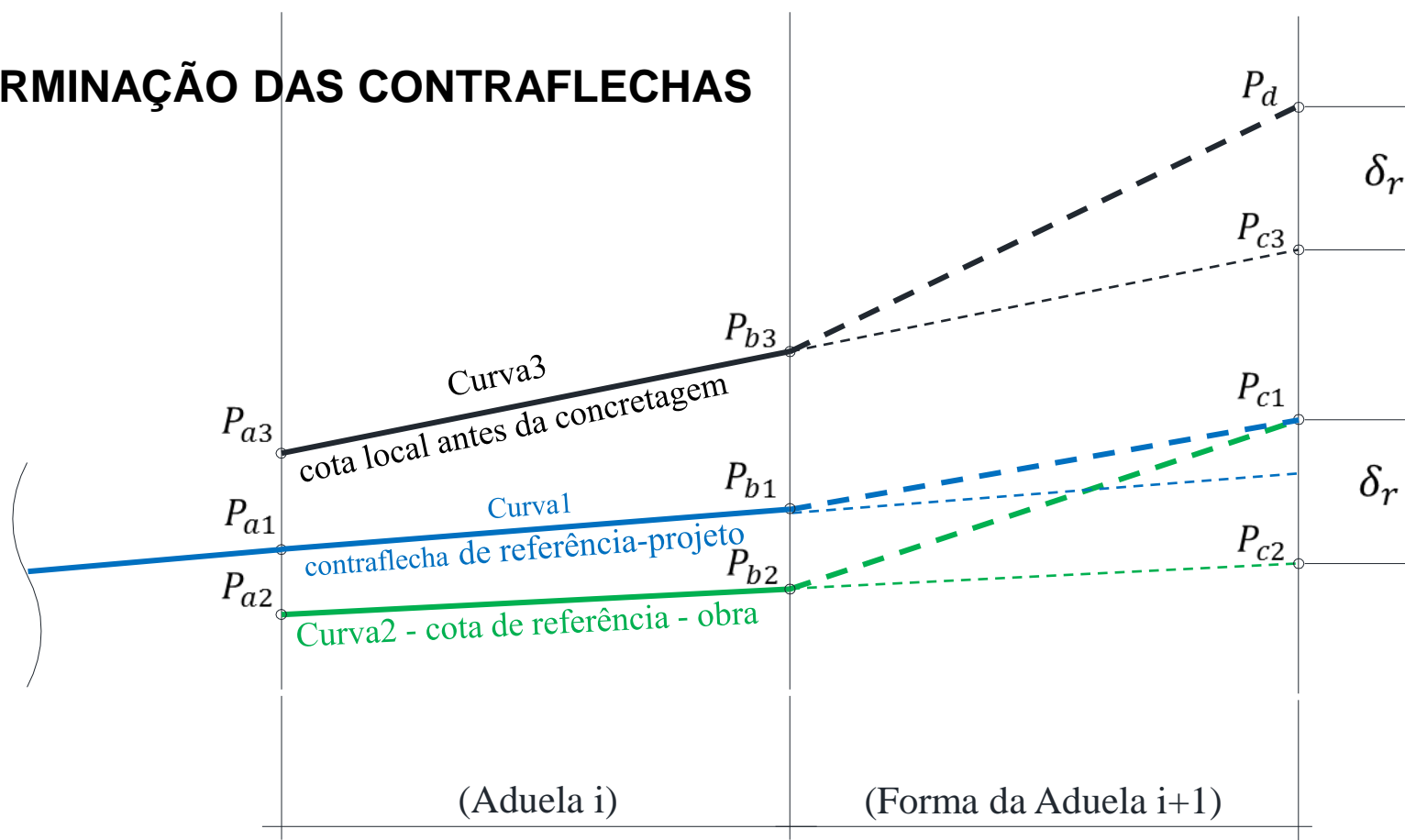
### **FATORES ADICIONAIS QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NO CÁLCULO DA CONTRAFLECHA**

- DEFORMAÇÃO DA TRELIÇA
- CONTRAFLECHA ROTACIONAL (OBRAS CURVAS EM PLANTA)
- SUPERELEVAÇÃO (CONTROLE DAS COTAS NAS BORDAS DA ESTRUTURA)

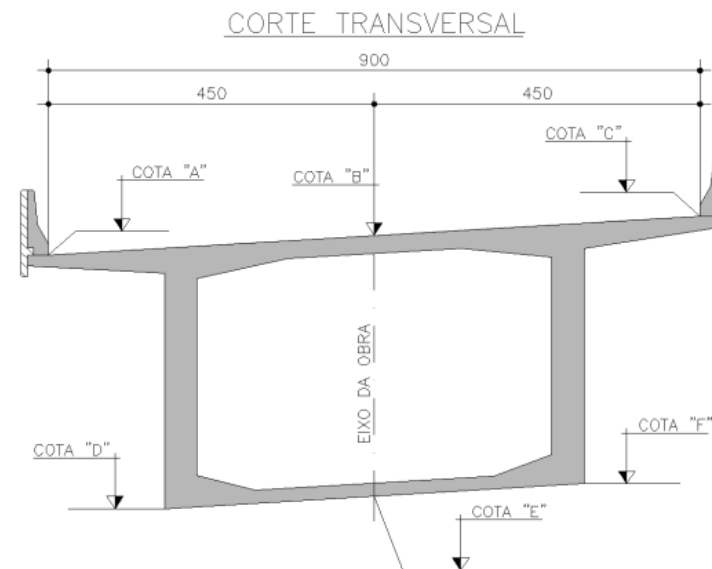
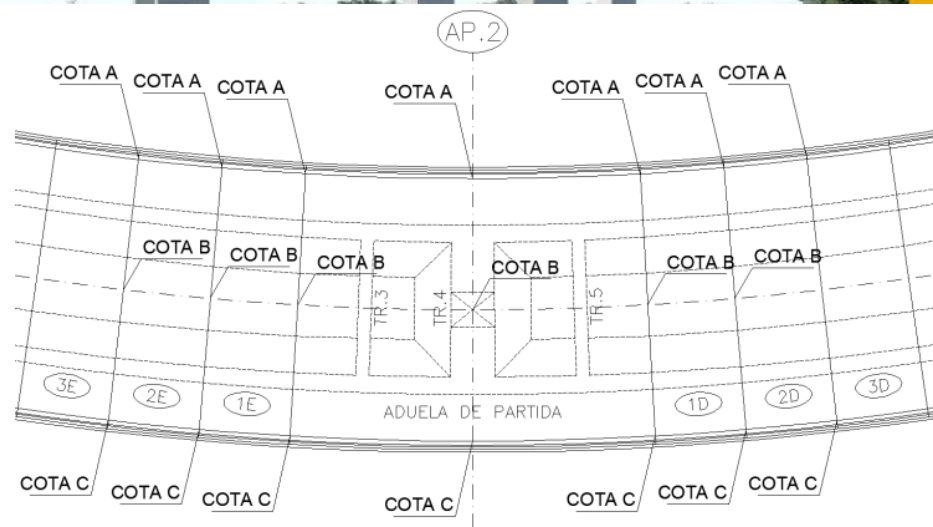
## DETERMINAÇÃO DAS CONTRAFLECHAS



## DETERMINAÇÃO DAS CONTRAFLECHAS





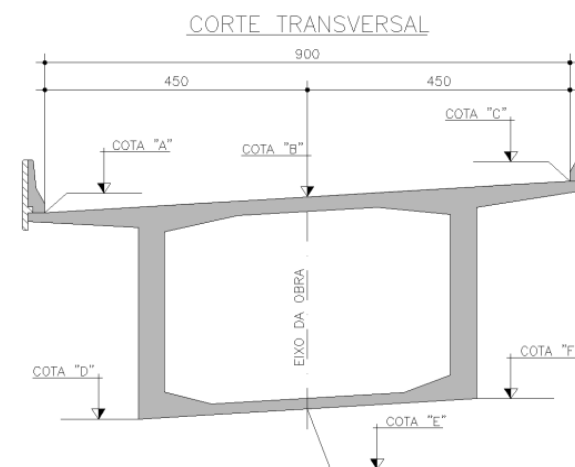
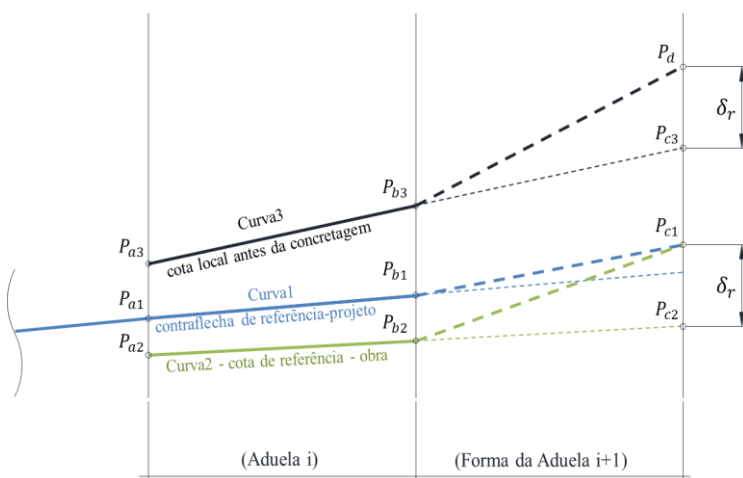


ADUELA	ADUELA DE PARTIDA									ADUELA 1														
	CONCRETAGEM			PROTENSÃO			AVANÇO DA TRELIÇA			CONCRETAGEM			PROTENSÃO			AVANÇO DA TRELIÇA								
	HORA:	08:00			HORA:	08:00			HORA:	08:30			HORA:	08:00			HORA:	08:20			HORA:	10:00		
	DATA:	25/11/2013			DATA:	05/12/2013			DATA:	20/01/2014			DATA:	03/02/2014			DATA:	04/02/2014			DATA:	08/02/2014		
	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	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	765,411	765,657	765,896			
Partida	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	765,418	765,685	765,929			
PartidaD	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	765,406	765,649	765,895			
1D										765,378	765,618	765,858	765,378	765,617	765,858	765,372	765,616	765,857						
2D																								

## EXEMPLO DE CONTRA FLECHA DA ADUELA 2

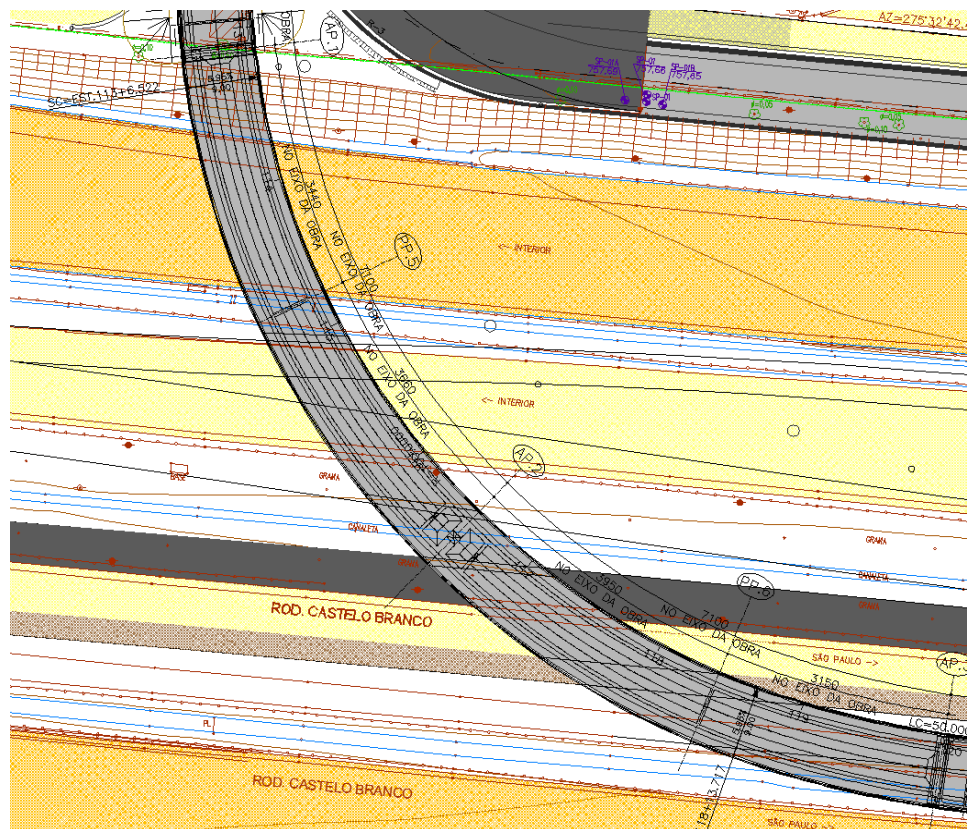
	COTA LEVANTADA EM CAMPO (m)		TAMANHO DA ADUELA (m)			COTA PROJETADA CAMPO (Pc2)	COTA DE PROJETO (m)	CONTRAFLECHA VERTICAL (m)	COTA DE POSICIONAMENTO DA FORMA (Pc1)	CONTRAFLECHA RELATIVA ( $\delta_r$ )
	PartidaE	1E	PartidaE	1E	2E	2E	2E	2E	2E	2E
<b>COTA B</b>	765,657	765,638	6,000	3,000	3,000	765,619	765,562	0,0009	765,563	-0,056

	PartidaD	1D	PartidaD	1D	2D	2D	2D	2D	2D	2D
<b>COTA B</b>	765,649	765,616	6,000	3,000	3,000	765,583	765,543	0,0009	765,544	-0,039



## Viaduto sobre a rodovia Castelo Branco

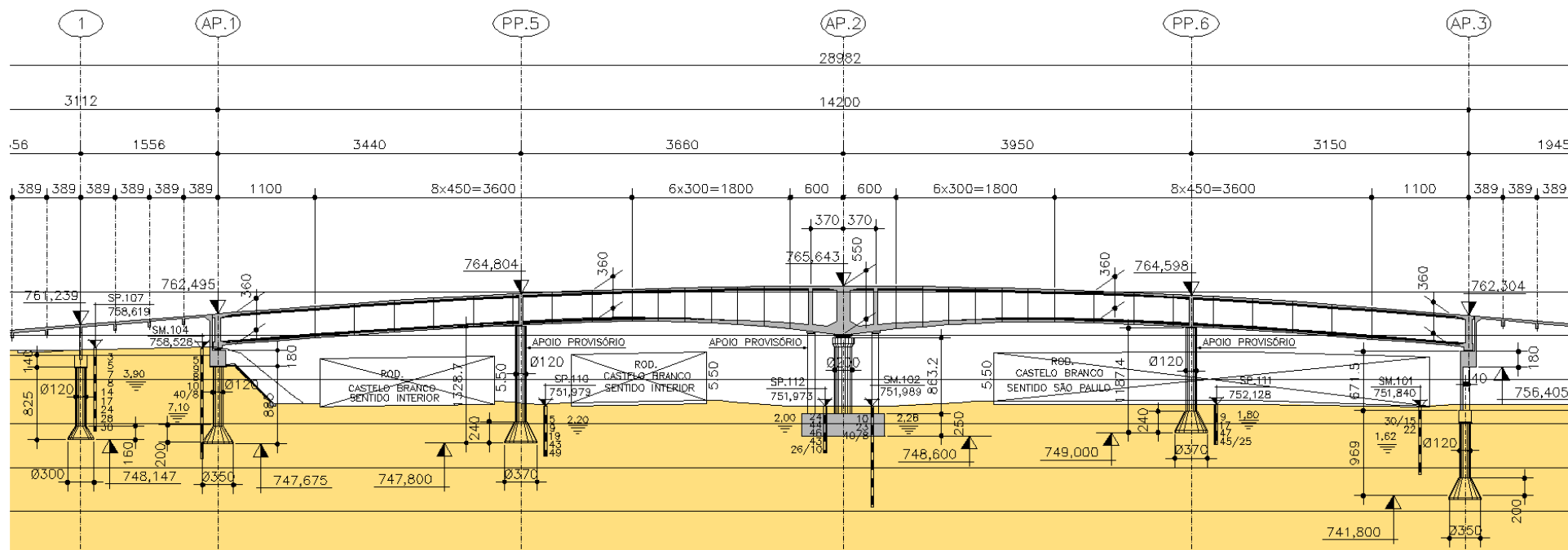
### CARACTERÍSTICAS DA OBRA



- 142m DE EXTENSÃO TOTAL SENDO 71m EXECUTADO EM BALANÇO SUCESSIVO PARA CADA LADO DO APOIO CENTRAL (DISPARO DUPLO)
- 15 ADUELAS EM CADA LADO DO APOIO PRINCIPAL
- RAIOS DE APROXIMANDAMENTE 100m EM PLANTA
- SUPERELEVÇÃO VARIÁVEL SENDO QUE A MAIOR PARTE DO TABULEIRO SE ENCONTRA COM 5,95% DE SUPERELEVÇÃO
- PILARES PROVISÓRIOS JUNTO AO APOIO PRINCIPAL NA FASE CONSTRUTIVA
- PILARES PROVISÓRIOS JUNTO A ADUELA 9 DO LADO ESQUERDO E NA ADUELA 10 DO LADO DIREITO



## APLICAÇÃO

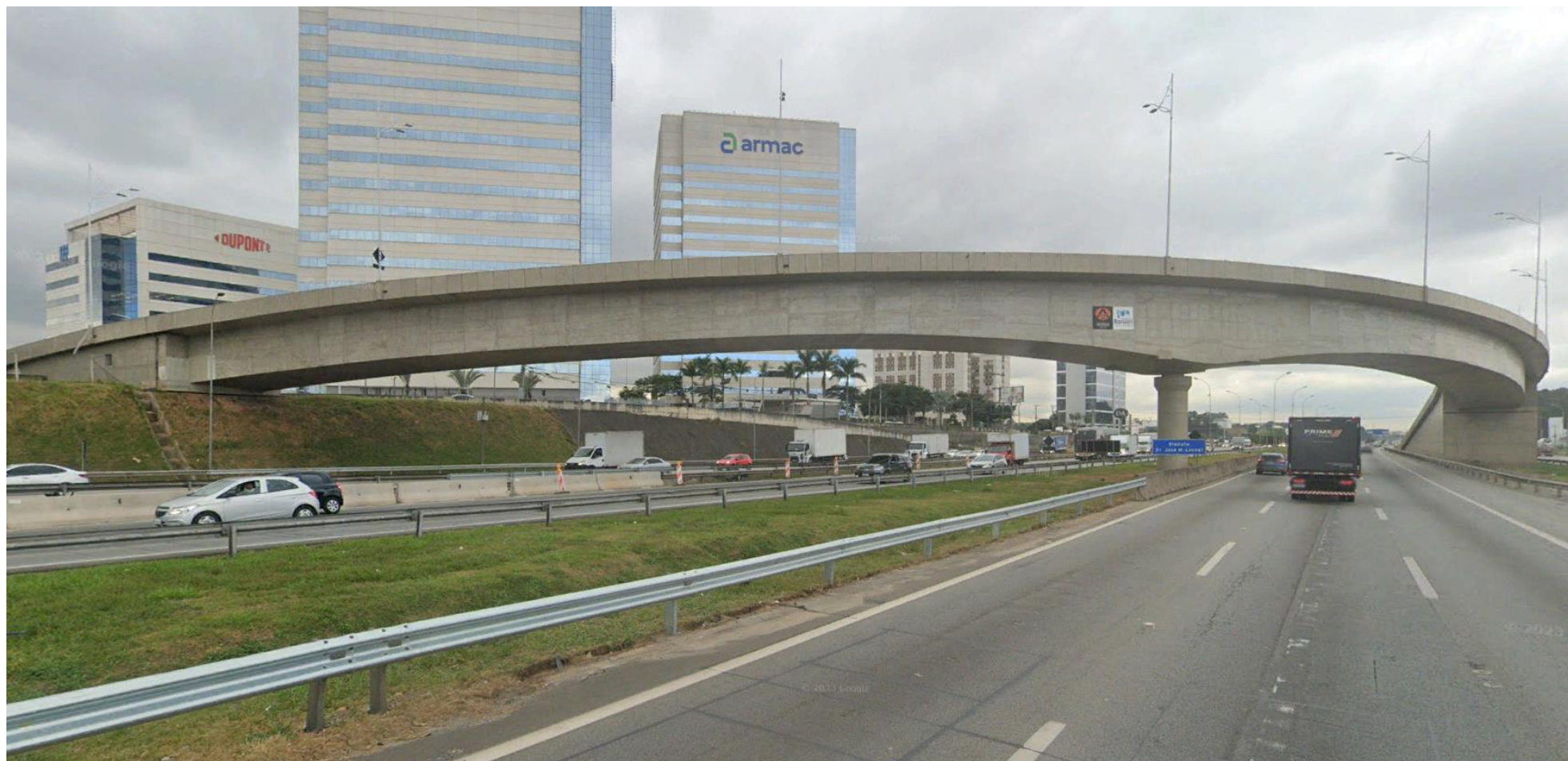


BALANÇO SUCESSIVO NA AV. TUCUNARÉ, SOBRE A RODOVIA PRESIDENTE  
CASTELO BRANCO – BARUERI – SÃO PAULO



**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

**10 de novembro  
PUCRS  
Porto Alegre - RS**





**III Seminário Sul  
Brasileiro de Pontes  
e Estruturas**

**10 de novembro**  
**PUCRS**  
Porto Alegre - RS

**MUITO OBRIGADO !**

Eng<sup>o</sup> Rui Oyamada

