

## **Estudo dos Efeitos Reológicos em Tabuleiros de Pontes Pré-fabricadas**

**Marcelo Leite de Melo Filho<sup>1</sup>, Benjamin Ernani Diaz<sup>2</sup>, Flávia Moll de S. Judice<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Escola Politécnica -UFRJ / marcelomelo@poli.ufrj.br

<sup>2</sup>Escola Politécnica -UFRJ / ernani.diaz@gmail.com

<sup>3</sup>Escola Politécnica -UFRJ / flaviamoll@poli.ufrj.br

### **Resumo**

A necessidade de rapidez na execução de obras de infraestrutura e o avanço tecnológico da construção no Brasil têm levado à execução de pontes em estruturas pré-fabricadas com vãos livres cada vez maiores. Buscando atender à essa necessidade, como também às prerrogativas da engenharia de transportes que envolve o método executivo das pontes pré-fabricadas, desenvolveu-se um sistema de ligação entre peças de concreto que permite aumentar o comprimento das longarinas, com até 25 m de extensão, para que atendam vãos de até 40 m. Esse procedimento constitui-se da união do trecho central da viga protendida pré-tensionada com extremidades em concreto armado que se solidarizam em campo com o uso da pós-tensão. A concretagem das longarinas em duas fases e a protensão em idades distintas requer minuciosa análise estrutural. Todavia, a complexidade da análise, que envolve a consideração dos efeitos reológicos nas etapas construtivas da peça, leva, muitas vezes, ao uso de processos simplificados que não retratam o comportamento real da estrutura. Este trabalho avalia as tensões e as deformações do concreto e do aço de protensão a partir de sofisticada análise reológica com o uso do método dos elementos finitos. As diversas fases de construção são levadas em conta a partir da idade das peças de concreto pré-fabricadas. Para isso, são empregadas as prescrições normativas do moderno código modelo CEB-FIB 2010. As respostas obtidas são comparadas com a análise elástica convencional.

### **Palavras-chave**

Reologia; Fluência; Concreto Protendido; Vigas pré-fabricadas; Pré-tração; Fases construtivas.

### **Introdução**

A execução de pontes e viadutos com vigas pré-moldadas ou pré-fabricadas protendidas é um dos métodos construtivos mais utilizados no mundo para construção de pontes com vãos de até 40 metros.

A utilização de vigas pré-moldadas de concreto teve início, no Brasil, na década de 30 e, com o avanço da tecnologia da protensão, do sistema de transporte e de montagem, essa técnica teve grande avanço nos anos de 1950.

Já o setor de pré-fabricação, presente no país há mais de 50 anos, ganhou grande destaque nos últimos 10 anos. Isso se deveu, principalmente, ao sucesso no cumprimento do cronograma das obras destinadas aos eventos esportivos no Brasil, garantindo elevada produtividade e rapidez na execução.

Por sua vez, a construção de pontes e viadutos pré-fabricados requer o transporte rodoviário de peças de grandes dimensões, tornando-se necessário o serviço de batedores para o transporte de vigas com comprimentos superiores a 25 m. Para superar essas limitações, novas técnicas de produção vêm sendo desenvolvidas e utilizadas para possibilitar a execução de pontes pré-fabricadas com vãos maiores que 25 m.

O sistema de protensão mista combina as técnicas da pré-tração e da pós-tração em vigas com vãos entre 25m e 40m. Nesse sistema, a parte central da longarina, com cerca de 20m de comprimento, é pré-fabricada em pista de protensão com o uso da aderência inicial. Para vencer o vão da obra, unem-se, em campo, extremidades pré-fabricadas em concreto armado (inicialmente) ao corpo central da viga por meio de protensão posterior aderente.

O projeto estrutural das obras-de-arte com diversas fases construtivas necessita, além do dimensionamento no Estado Limite Último (ELU), da verificação da segurança da estrutura em cada etapa da construção e ao longo do tempo. Usualmente, a verificação em serviço dessas estruturas é feita com base na distribuição elástica de tensões para combinações frequentes de ações, levando-se em conta a descontinuidade de tensões na interface laje-viga e as perdas de protensão ao longo do tempo.

O comportamento de estruturas de concreto protendido com diversas fases construtivas é demasiadamente complexo. A reologia do concreto provoca a redistribuição de tensões ao longo da seção transversal causada pelos efeitos da retração e da fluência do concreto, bem como da relaxação do aço de protensão. A desconsideração desses efeitos pode levar a estimativas equivocadas de flecha, fissuração e rigidez da estrutura.

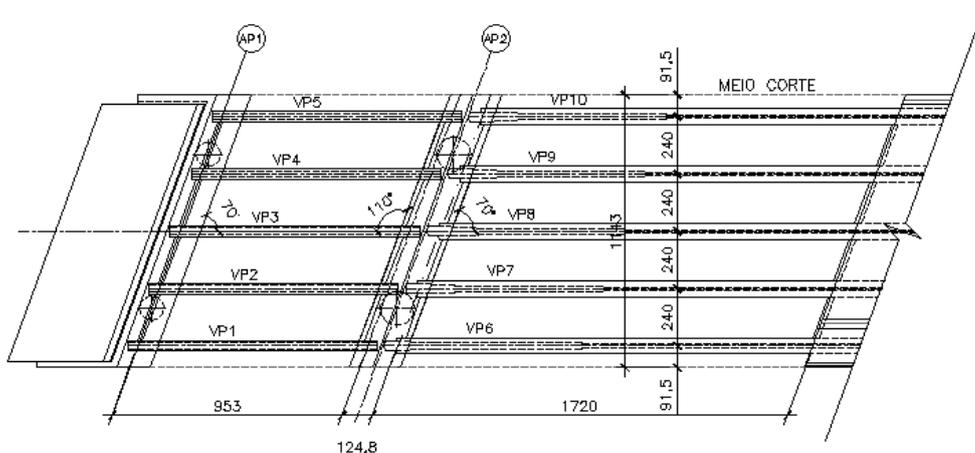
Os programas computacionais de análise estrutural estão cada vez mais sofisticados, permitindo a avaliação da não-linearidade física (dos materiais) e geométrica (da estrutura), considerando as diversas fases de carregamento, os diferentes materiais utilizados e a interação entre as partes.

Com o propósito de avaliar os efeitos da reologia e das etapas construtivas em tabuleiros de pontes constituídos por vigas com protensão mista (pré-tração e pós-tração), encontra-se em desenvolvimento o trabalho de dissertação do Mestrado Profissional do Programa de Projeto de Estruturas (PPE) da Escola Politécnica da UFRJ. Nesse estudo, emprega-se um *software* comercial para a análise estrutural de um viaduto real com a consideração dos efeitos reológicos. As funções de retração e de fluência do concreto e de relaxação do aço são definidas pelo código modelo CEB-FIB 2010.

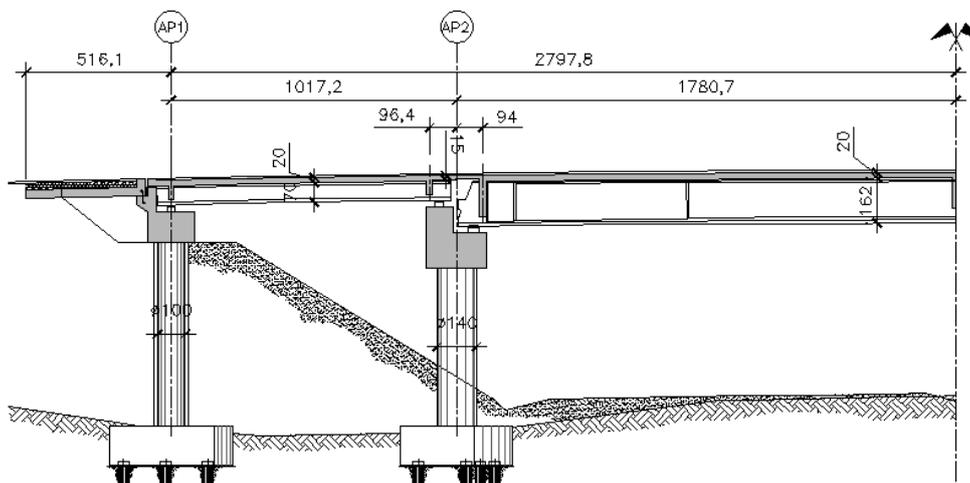
Apresenta-se, a seguir, parte do trabalho em desenvolvimento.

### **Estrutura analisada**

As Figuras 1 e 2 apresentam o Viaduto de Acesso de Silva Jardim, no Estado do Rio de Janeiro. Todas as medidas apresentadas estão em centímetros, exceto quando indicado.



**Figura 1 – Viaduto de Acesso de Silva Jardim - Planta de forma - Meio corte.**



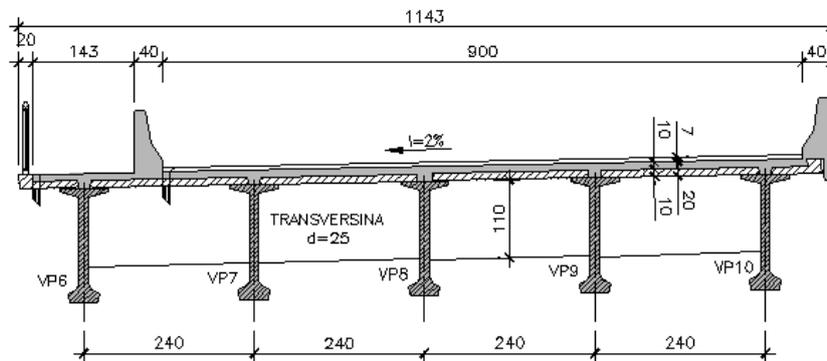
**Figura 2 – Viaduto de Acesso de Silva Jardim - Seção longitudinal.**

A estrutura é constituída por três vãos isostáticos: dois vãos laterais com 10,17m e um vão central com 35,61m, totalizando 55,96m de extensão.

Os tabuleiros, com largura constante de 11,43m, comportam uma pista com duas faixas de tráfego e um passeio lateral. Cinco vigas pré-fabricadas, com seção transversal do tipo "T", altura de 162 cm e afastadas entre si de 2,40 m, dão apoio à laje em concreto armado com 20 cm de espessura. As barreiras do tipo "New Jersey" encontram-se posicionadas nas extremidades da pista, como também o guarda-corpo na lateral do passeio, conforme apresentado na Figura 3.

No vão central, além das transversinas nos apoios, é prevista uma transversina em concreto armado no meio do vão. As vigas apoiam-se sobre aparelhos de apoio em elastômero fretado assentes sobre travessa de concreto armado.

Para fins de análise do fenômeno reológico, admitem-se as seguintes simplificações: modelagem apenas do vão central do viaduto; eliminação da esconsidade e concretagem da laje *in loco*.

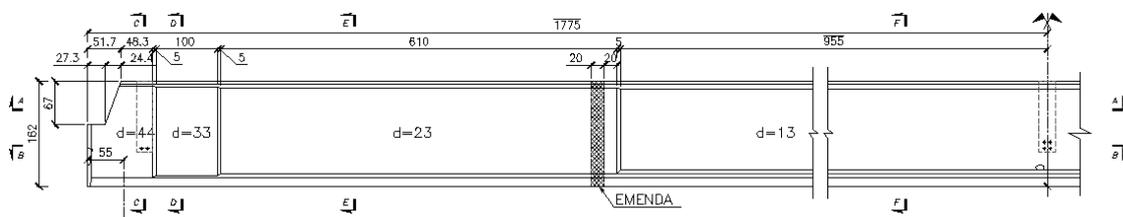


**Figura 3 – Viaduto de Acesso de Silva Jardim - Seção transversal no meio do vão.**

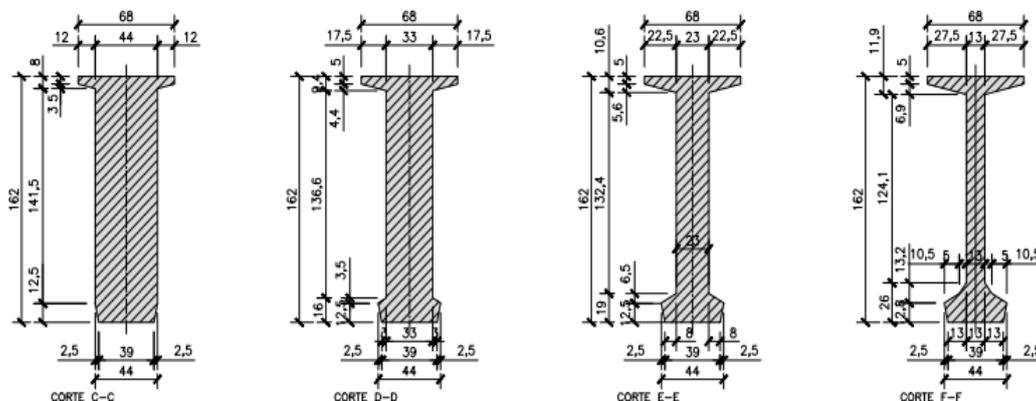
A viga é produzida em três trechos, separadamente. O trecho central tem geometria constante ao longo dos 19,6 m, com alma de espessura de 13 cm. Os trechos extremos apresentam os seguintes engrossamentos da alma: 6,10 m com 23 cm; 1,0 m com 33 cm; e 1,0 m com 44 cm.

A fim de permitir a acoplagem do macaco hidráulico para protensão após a concretagem da laje, a viga apresenta, em sua extremidade, um recorte em diagonal (chanfro).

As Figuras 4 e 5 ilustram a viga em elevação e em corte transversal.



**Figura 4 – Seção longitudinal da viga longarina.**



**Figura 5 – Seção transversal da viga longarina.**

A resistência à compressão característica das vigas e lajes é de 45MPa e 30 MPa, respectivamente. Os módulos de elasticidade foram determinados de acordo com a NBR6118(2014).

A armadura ativa das vigas é constituída de cordoalhas de 12,7 mm, CP-210 RB, com resistência à tração característica de 2100 MPa ( $f_{ptk}$ ). A tensão inicial das cordoalhas foi aplicada de acordo com os limites estabelecidos pela NBR6118(2014).

Além do peso próprio dos elementos estruturais de concreto, foram consideradas também as sobrecargas permanentes devidas à pavimentação, às barreiras e ao guarda-corpo. As cargas móveis foram determinadas de acordo com a NBR7188(2013), considerando a linha de distribuição transversal de cargas da viga de bordo (mais carregada). Por se tratar de análise de tensões e de deformações em serviço, utilizou-se a combinação frequente de ações, considerando 50% da carga móvel normativa.

### Fases construtivas

A execução do tabuleiro do viaduto em estudo é feita em três fases. A primeira, realizada em fábrica, consiste na protensão com aderência inicial do trecho central da viga isolada com uso de 10 cordoalhas com tensão inicial de 1600 MPa, cerca de sete dias após a concretagem. A segunda fase é realizada no canteiro de obras e consiste na ligação do trecho central da viga isolada com as extremidades em concreto armado. Para isso, unem-se a armadura passiva longitudinal principal dos trechos central e extremos com uso de luvas metálicas, faz-se o traspasse das armaduras de pele e concretiza-se a emenda no local. Em seguida, enfiam-se os cabos inferiores e aplica-se a protensão com tensão inicial de 1500 MPa.

Após o posicionamento das vigas sobre as travessas, as pré-lajes, com espessura de 10 cm, são posicionadas sobre as longarinas e realiza-se a concretagem do complemento de laje, resultando em uma espessura final de 20 cm. Nessa etapa, são também executadas as concretagens das transversinas de apoio e de meio de vão. A terceira fase de protensão é, então, realizada com o tensionamento do segundo cabo de protensão, complementando as fases construtivas.

### Modelo Computacional

A análise estrutural foi realizada com um *software* comercial, por meio de um modelo espacial com elementos de casca. O modelo computacional é apresentado na Figura 6.

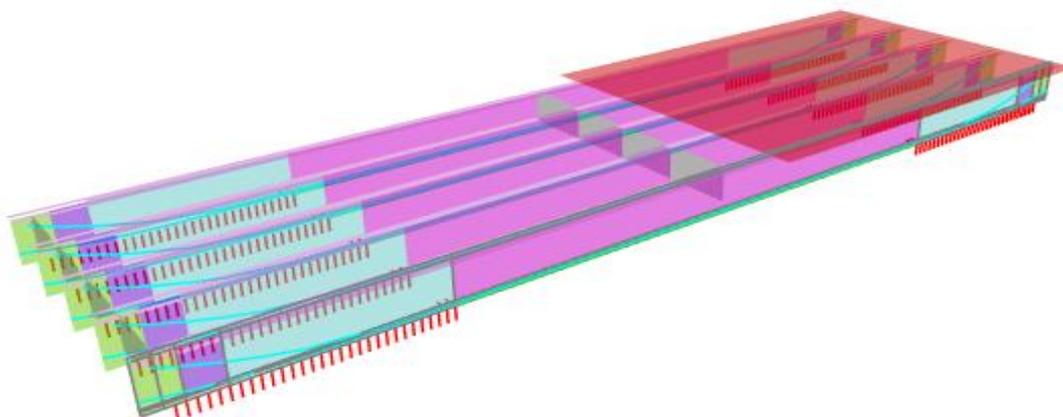
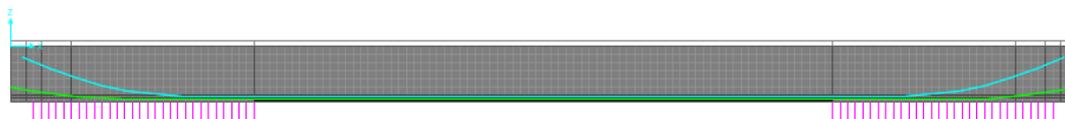


Figura 6 – Modelo computacional da estrutura.

Para a realização da análise reológica, foram fornecidos os dados de entrada para cálculo das funções de fluência e retração, tais como: a umidade relativa do ar (85% - típico do Rio de Janeiro); a espessura fictícia das peças (relação entre a área e o perímetro em contato com o ambiente); o tipo de cimento utilizado.

Devido às fases construtivas, foram dispostos apoios provisórios para os trechos extremos em concreto armado da longarina. Esses apoios foram modelados como barras rígidas ligadas a apoios do primeiro gênero e aos nós do bordo inferior da longarina. Os apoios permanentes em elastômero fretado foram modelados como apoios elásticos com rigidez calculada de acordo com a norma europeia EN 1337-3(2005).

A Figura 7 apresenta a disposição dos cabos de protensão e os apoios provisórios nas extremidades da viga.



**Figura 7 – Vista longitudinal do modelo.**

A partir da opção “Staged Construction” do programa de análise utilizado foi definida a sequência de construção, fazendo-se a adição ou remoção dos carregamentos em etapas de duração finita ou nula (carregamento imediato). Com o uso dessa ferramenta computacional foi possível avaliar os efeitos da retração e da fluência do concreto, levando-se em consideração as não-linearidades da estrutura (física e geométrica). A Tabela 1 apresenta as diversas etapas de carregamento, o tempo de cada etapa e o tempo decorrido desde o início da construção.

Toda a estrutura foi adicionada na primeira etapa. Na etapa subsequente, foram reduzidos os módulos de elasticidade dos elementos não existentes no início da montagem do viaduto, transformando-os em “elementos fantasma”, entre eles: as emendas das vigas, os cabos de pós-tração, a laje de rolamento e as transversinas. Aos sete dias, o trecho central foi protendido e o peso próprio deste trecho começou a atuar.

Após a transferência da protensão para a viga pré-tracionada, as propriedades das transversinas, das emendas das vigas e do cabo de protensão da segunda fase foram alteradas para as suas propriedades reais, em etapa com duração nula. Passados 10 dias, removeram-se os apoios provisórios e acrescentou-se a carga de peso-próprio das extremidades da longarina e das transversinas e o cabo inferior foi protendido. Com 38 dias, a laje foi concretada (não foram consideradas lajes pré-fabricadas) e os cabos da terceira etapa de protensão foram enfiados, passando a ter propriedades reais. Após quatro dias, foi retirado o escoramento da laje e aplicou-se a protensão do último cabo. Com 60 dias, foram introduzidas as demais cargas permanentes (pavimento e barreiras). As cargas móveis foram aplicadas e retiradas nas idades de 110, 210, 510, 1010 e 2010 dias, com fator de 0,5.

**Tabela 1 – Definição das fases construtivas.**

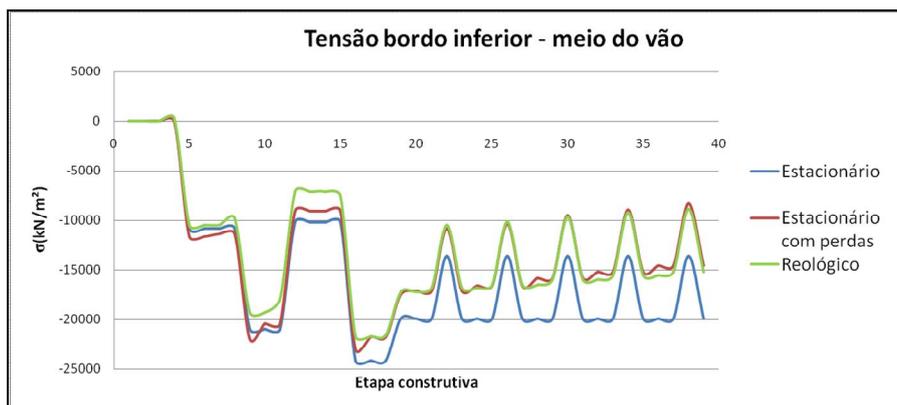
DEFINIÇÃO DAS ETAPAS CONSTRUTIVAS									
Etapa	Duração (dias)	Idade (dias)	Nome da operação	Operação	Nome do grupo	Nome do carregamento	Fator de carga		
1	0	0	Adicionar estruturas	Add Structure	Apoio provisório				
				Add Structure	Viga - trecho central				
				Add Structure	Laje				
				Add Structure	Viga - Extremidade				
				Add Structure	Transversina				
				Add Structure	Emenda				
2	0	0	Modificar estrutura	Change Modifiers	Emenda (Ghost)				
				Change Modifiers	Transversina (Ghost)				
				Change Section	Laje (Ghost)				
				Change Modifiers	Protensão 2 (Ghost)				
				Change Modifiers	Protensão 3 (Ghost)				
3	7	0	7 dias						
4	0	7	PP+protensão 1	Load Objects	Viga - trecho central	DEAD (Peso-Próprio)	1		
				Load Objects	Viga - trecho central	Pretracção	1		
5		7	Adiciona Viga Extrema	Change Modifiers	Emenda (FULL)				
				Change Modifiers	Transversina (FULL)				
				Change Modifiers	Protensão 2 (FULL)				
6	10	7	10 dias						
7	0	17	Protensão 2	Remove Structure	Apoio provisório				
				Load Objects	Viga - Extremidade			DEAD (Peso-Próprio)	1
				Load Objects	Viga - Extremidade			Protensão Aderente 1	1
				Load Objects	Transversina			DEAD (Peso-Próprio)	1
				Load Objects	Emenda			DEAD (Peso-Próprio)	1
8	21	17	21 dias						
9	0	38	Aplica laje	Load Objects	Viga Completa	Aplica_laje	1		
10	0		Adiciona Laje	Change Section	Laje (FULL)				
				Change Modifiers	Protensão 3 (FULL)				
11	4	38	4 dias						
12	0	42	Protensão 3	Load Objects	Laje	DEAD (Peso-Próprio)	1		
				Load Objects	Viga Completa	Protensao Aderente 2	1		
				Load Objects	Viga Completa	Aplica_laje	-1		
13	18	42	18 dias						
14	0	60	G2	Load Objects	Laje	Pavimento	1		
				Load Objects	Laje	Guarda rodas	1		
15	50		50 dias						
16	0	110	CM	Load Objects	Laje	Carga móvel	0,5		
17	0		-CM	Load Objects	Laje	Carga móvel	-0,5		
18	100	110	100 dias						
19	0	210	CM 1	Load Objects	Laje	Carga móvel	0,5		
20	0		-CM1	Load Objects	Laje	Carga móvel	-0,5		
21	300	210	300 dias						
22	0	510	CM 2	Load Objects	Laje	Carga móvel	0,5		
23	0		-CM 2	Load Objects	Laje	Carga móvel	-0,5		
24	500	510	500 dias						
25	0	1010	CM 3	Load Objects	Laje	Carga móvel	0,5		
26	0		-CM 3	Load Objects	Laje	Carga móvel	-0,5		
27	1000	1010	1000 dias						
28	0	2010	CM 4	Load Objects	Laje	Carga móvel	0,5		
29	0		-CM 4	Load Objects	Laje	Carga móvel	-0,5		

## Resultado das análises

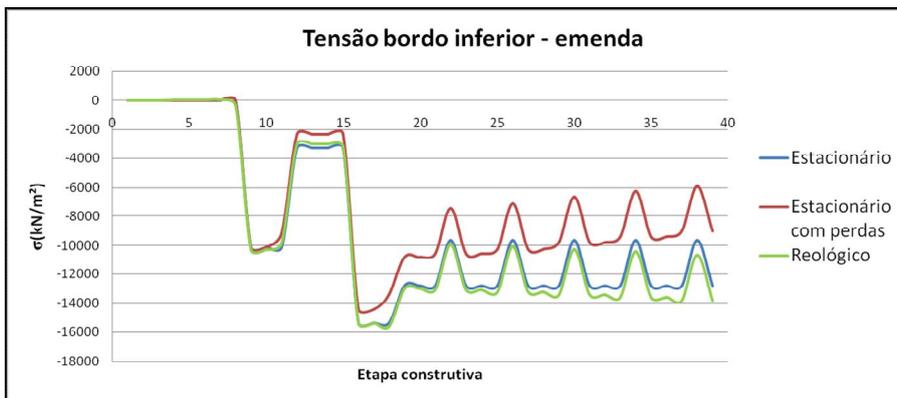
Para apresentar o estudo da influência do comportamento reológico do concreto no tabuleiro são comparadas três análises distintas. A primeira abordagem, tratada como estacionária, utiliza-se apenas da análise elástica do modelo computacional em elementos finitos, considerando as fases construtivas da ponte, porém as propriedades dos materiais não variam de acordo com a idade do concreto. Na segunda abordagem também não são considerados os efeitos reológicos, mas foram incluídas as perdas diferidas de protensão, calculadas de acordo com prescrições normativas da norma

européia EN 1992-1-1(2002). A terceira análise, denominada reológica, considera as deformações do concreto e do aço de protensão ao longo do tempo.

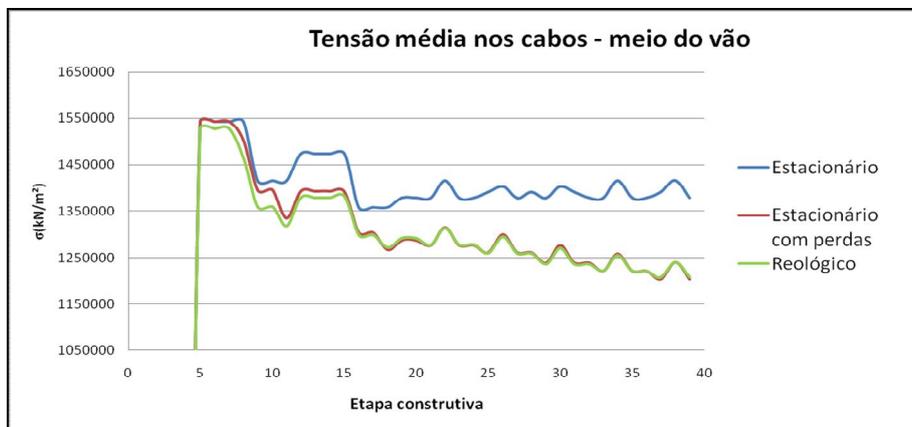
Os resultados obtidos da análise são apresentados na forma gráfica, para as diversas etapas construtivas. Para avaliação do comportamento estrutural, são comparadas as tensões normais no bordo inferior da viga (Figuras 8 e 9) e nos cabos de protensão (Figuras 10 e 11), tanto na seção do meio do vão, como na região da emenda.



**Figura 8 – Tensão normal no bordo inferior - meio do vão.**



**Figura 9 – Tensão normal no bordo inferior - região da emenda.**



**Figura 10 – Tensão média nos cabos - meio do vão.**

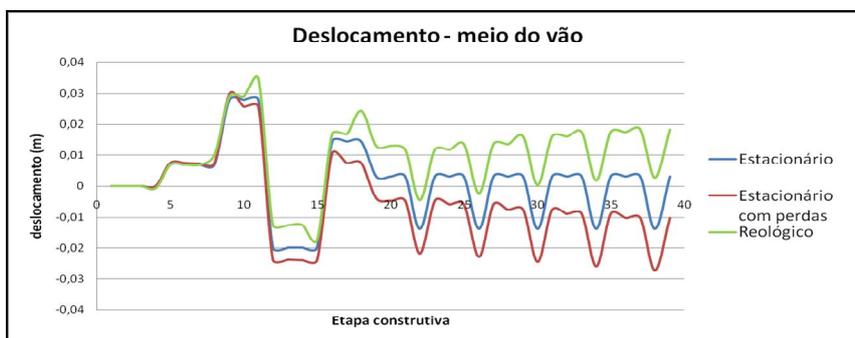


**Figura 11 – Tensão média nos cabos - região da emenda**

Observa-se, na Figura 8, que as tensões de compressão no bordo inferior diminuem com o tempo devido às perdas por fluência, retração e relaxação. As tensões calculadas a partir da abordagem estacionária com perdas e da abordagem reológica foram praticamente coincidentes, indicando que as estimativas da norma europeia EN 1992-1-1(2005) para cálculo das perdas são satisfatórias. Por outro lado, na seção da emenda (Figura 9), as tensões calculadas a partir da abordagem estacionária com perdas foram significativamente menores que as da abordagem reológica, indicando que a extrapolação do cálculo das perdas de protensão para outras seções além do meio do vão levam a valores superestimados dessas perdas.

De maneira semelhante, nota-se, na Figura 10, que as tensões médias nos cabos, na seção de meio de vão, obtidas a partir das abordagens estacionária com perdas e reológica foram praticamente idênticas, indicando que as prescrições normativas da norma europeia EN 1992-1-1(2005) atendem satisfatoriamente ao cálculo das perdas de protensão. Na região da emenda (Figura 11), porém, as perdas calculadas foram superestimadas, conforme mostra o resultado observado na Figura 9.

A Figura 12 ilustra os deslocamentos verticais na seção do meio do vão da longarina extrema.



**Figura 12 – Deslocamento vertical em metros no meio do vão**

Nota-se, da Figura 12, que as diversas abordagens levam a resultados significativamente distintos. Na análise estacionária, após a introdução de todos os carregamentos permanentes, os deslocamentos são constantes ao longo da vida útil. Isso se deve ao fato dessa abordagem não levar em conta as perdas de protensão, nem as propriedades reológicas dos materiais.

A abordagem estacionária com perdas, por sua vez, ao considerar a queda de tensão nos cabos reduz a compressão excêntrica da seção e, conseqüentemente, a contra-flecha decorrente da protensão. Isso fica evidente ao se verificar, ao longo do tempo, o aumento dos deslocamentos da seção do meio do vão.

Por outro lado, a abordagem reológica determina, na seção do meio do vão, deslocamentos positivos (para cima). Isso representa o comportamento real da estrutura, pois a fluência provoca encurtamento da porção comprimida da seção transversal, aumentando a contra-flecha e reduzindo os deslocamentos verticais.

## Conclusões

A evolução da análise computacional permite que, nos dias atuais, estruturas de elevada complexidade sejam avaliadas detalhadamente por meio de processos numéricos que levam em conta as tensões e as deformações ao longo do tempo com relativa facilidade. Isso garante que estruturas sofisticadas sejam analisadas de forma precisa, evitando as simplificações de cálculo e aumentando a segurança do projeto.

O estudo do tabuleiro de vigas múltiplas pré-fabricadas com sistema de protensão mista (pré-tração e pós-tração) aqui apresentado foi desenvolvido a partir de modelo computacional em elementos finitos considerando os efeitos reológicos e as diversas fases construtivas. Os resultados mostraram que a extrapolação das perdas de protensão para além da seção do meio do vão pode levar a valores superestimados dessas perdas. As diversas abordagens mostraram que os deslocamentos podem ser avaliados erroneamente em uma análise aproximada, levando a valores contrários ao do comportamento real da estrutura.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BAZANT, Z. P. *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*. Wiley Interscience, Evanston, 1998.
- CEB-FIP. *Code-Modèle CEB-FIP pour les Structures en Béton*. Paris, 1978.
- FIB. *FIB Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn, Berlin, 2013
- GILBERT, R. I.; RANZI, G. *Time-dependent behaviour of concrete structures*. New York: Spon Press, 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- NEVILLE, A. M.; DILGER, W. H.; BROOKS, J. J., *Creep of Plain and Structural Concrete*. [S.l.]: Construction Press, 1983.
- NORMA EUROPEIA EN 1992-1, *Design of Concrete Structures - Part 1*. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica, 2002.
- NORMA EUROPEIA EN 1337-3, *Structural Bearings - Part 3: Elastomeric Bearings*. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica, 2005.
- RODRIGUES, G. S. S., *Contribuição ao Estudo da retração e fluência e seus mecanismos de atuação a Baixas idades em Concretos Estruturais*. ENC/FT/UnB. Distrito Federal. 2010.
- SOUZA, M. L. M., *Estudo de fluência e Retração na Análise de um Tabuleiro em Vigas Múltiplas de uma Ponte Rodoviária*. UFRJ/Escola Politécnica. Rio de Janeiro. 2013.
- TROXELL, G. E.; RAPHAEL, J. M.; DAVIS, R. E. *Long term Creep and shrinkage Test of Plain and Reinforced Concrete*, 1958.