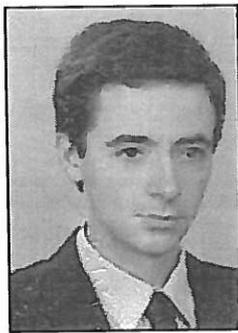
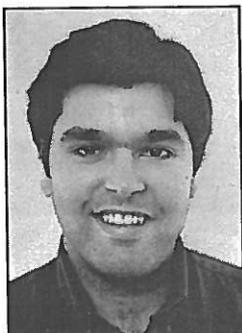


OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TABULEIRO DA PONTE SOBRE O RIO VOUGA NA EN 329

Bruno J. Afonso Costa¹, Carlos Félix², Joaquim A. Figueiras³

¹Bolseiro FCT/ADI, LABEST/FEUP, Porto, ²Prof. Coordenador, ISEP/LABEST, Porto

³Prof. Catedrático, FEUP, Porto



SUMÁRIO

O ensaio de carga da Ponte sobre o Rio Vouga na EN239, conduzido pelo LABEST - Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da FEUP, apresentou resultados interessantes que importa dar a conhecer, para uma melhor compreensão dos fenómenos que regem o comportamento dos tabuleiros de laje vigada pré-fabricada, uma vez que constitui uma solução estrutural cada vez mais utilizada pelas vantagens económica e tempo de execução. O presente artigo descreve de uma forma sucinta o sistema de monitorização utilizado, apresentando-se os resultados obtidos com os diversos transdutores instalados. Estes valores são confrontados com os obtidos da análise numérica.

1. INTRODUÇÃO

O ensaio de carga foi realizado pelo LABEST, após solicitação do mesmo por parte do Empreiteiro, com o intuito de verificar a efectiva conformidade da estrutura mediante a caracterização do seu comportamento, exigida pelo ICOR - Instituto para a Construção Rodoviária na qualidade de Dono de Obra. O tabuleiro da obra de arte, curvo em planta e alçado, é constituído por vigas pré-fabricadas, sobre as quais foi betonada "in situ" a laje da plataforma. As vigas foram pré-esforçadas em estaleiro com cordões aderentes, de traçado recto. Após a betonagem da laje superior foi dado, por pós-tensão, pré-esforço de continuidade às vigas, tendo-se verificado, sistematicamente, durante estas operações, alongamentos menores que os previstos no projecto de aplicação de pré-

esforço, com diferenças da ordem dos 25% nos tramos intermédios da ponte⁽¹⁾.

2. DESCRIÇÃO GERAL DA OBRA

A ponte localiza-se entre os km's 14+045.000 e 14+275.000 da EN 329 e desenvolve-se em planta segundo uma curva circular de raio $R = 500\text{m}$ até ao km 14+146.648, seguida de uma clotóide com parâmetro $A = 335$ (Fig 1). A sua rasante é definida por uma curva de concordância côncava de raio $R = 7500\text{m}$. O tabuleiro é constituído por cinco vigas em "I" pré-fabricadas, em betão armado pré-esforçado e de altura constante, ligadas entre si por uma laje de betão armado com espessura de 0,25 m (incluindo as pré-lajes) em toda a largura do tabuleiro, perfazendo desta forma uma altura total de 2,00 m (Fig 2).

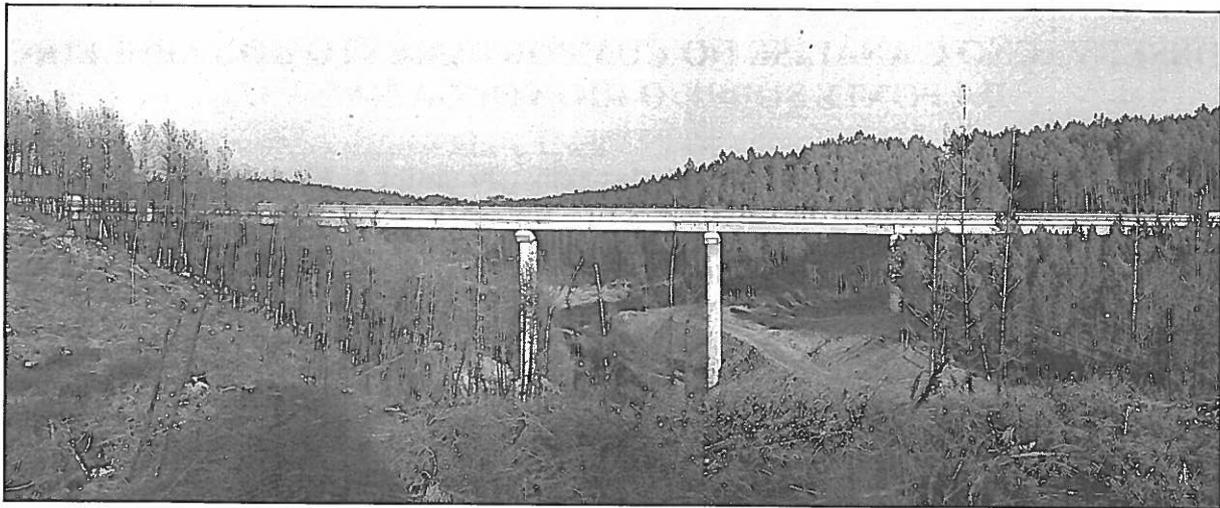


Fig 1: Vista geral da ponte sobre o Rio Vouga.

As vigas estão solidarizadas por carlingas nas secções dos apoios e vencem dois vãos extremos com 25 m e 5 vãos intermédios de 36 m, que se apoiam, em toda a largura do tabuleiro, numa viga de encabeçamento construída sobre os dois pilares de secção circular com diâmetro de 2,00 m, que por sua vez fundam no maciço

xistoso através de sapatas. O tabuleiro apoia nas vigas de encabeçamento e encontros mediante aparelhos de apoio em aço do tipo "panela", fixos na direcção transversal e longitudinal exceptuando os dois apoios de extremidade que são móveis nesta última direcção.

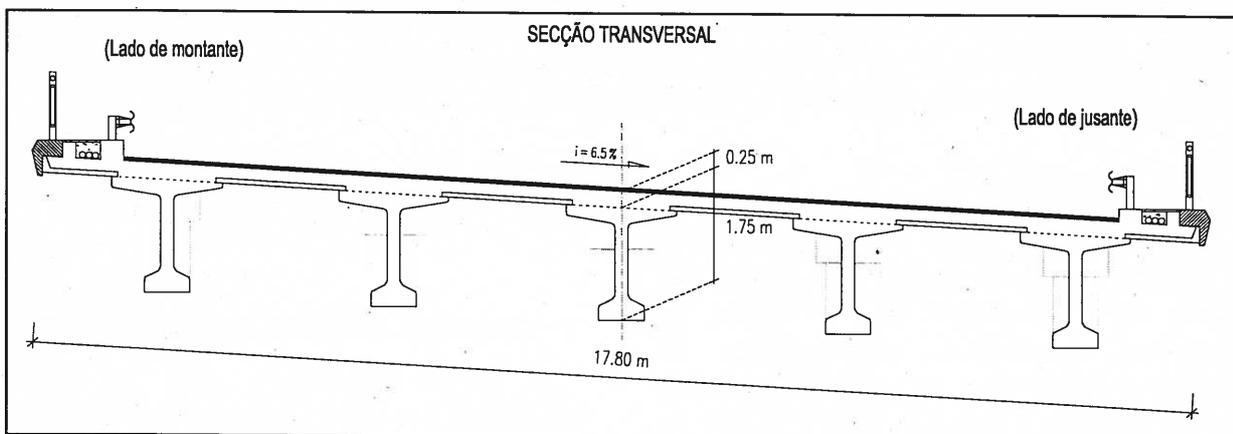


Fig 2: Secção transversal da ponte sobre o Rio Vouga.

3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO INSTALADO

A monitorização do comportamento do tabuleiro da ponte sobre o Rio Vouga, durante o ensaio de carga, inclui a observação das secções do tabuleiro S1 a S12 conforme se esquematiza na Figura 3. Para tal, procedeu-se à instalação de transdutores que possibilitaram a medição de cinco tipo de grandezas distintas: (i) deslocamento vertical de um dos apoios, secção S12, e a meio dos vãos do tabuleiro;

(ii) rotação do tabuleiro sobre os pilares P4 e P5; (iii) extensões nas vigas de betão armado pré-esforçado nas secções S6 e S10; (iv) abertura de fendas na interface carlinga-vigas longarinas nas secções S7 e S9; (v) temperatura.

Para a medição dos deslocamentos verticais das secções de meio-vão, foi utilizado um sistema próprio desenvolvido pelo LABEST⁽²⁾, baseado no sistema de nivelamento hidrostático tradicionalmente utilizado pelo LNEC, que preconiza a insta-

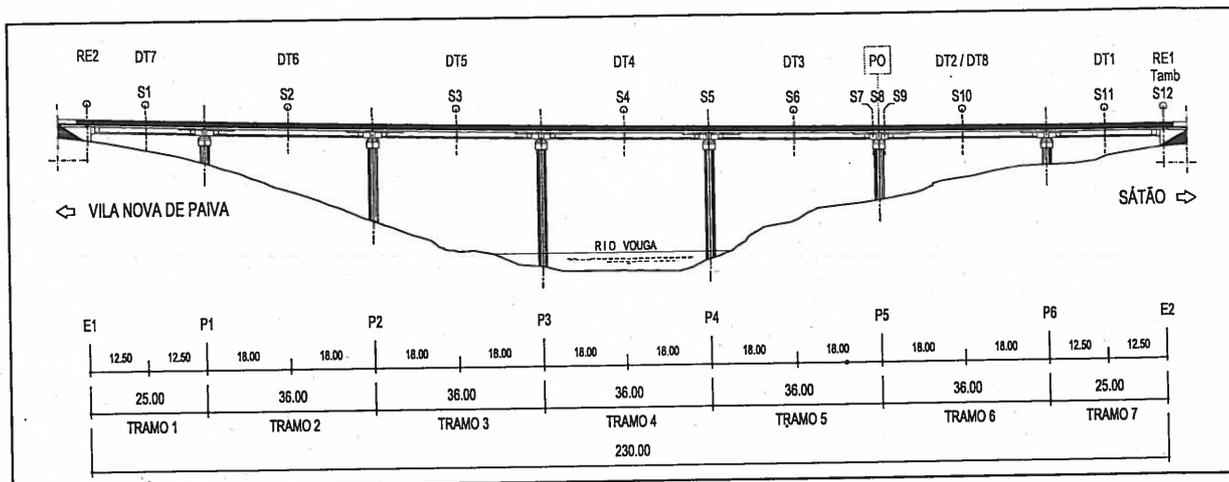


Figura 3: Corte longitudinal.

lação de sensores de pressão (Figura 8) nos pontos pretendidos (ver símbolos DT1 a DT7 na Figura 3).

A medição de extensões foi realizada na superfície lateral dos banzos inferiores das

vigas pré-fabricadas, com recurso a clip-gages de ponte completa (Fig 4 e Fig 5), as rotações com inclinómetros eléctricos (Fig 6) e as aberturas de fendas com LVDT's (Figura 7).

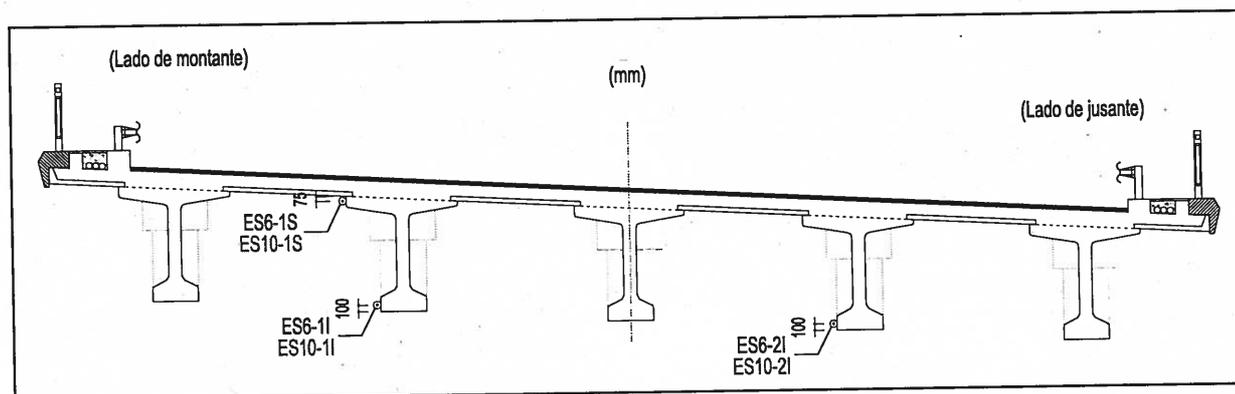


Fig 4: Localização dos clip-gages nas secções S6 e S10.

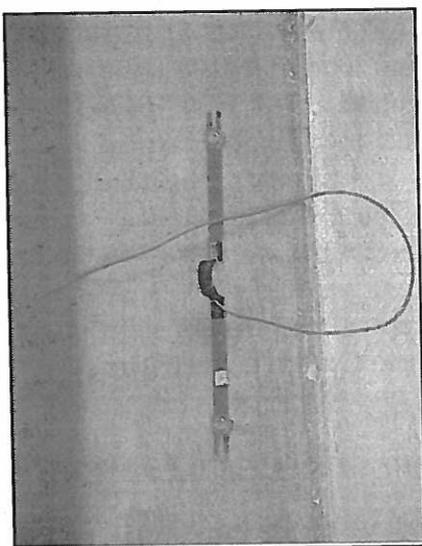


Fig 5: Clip-gage.



Fig 6: Inclinómetro eléctrico.

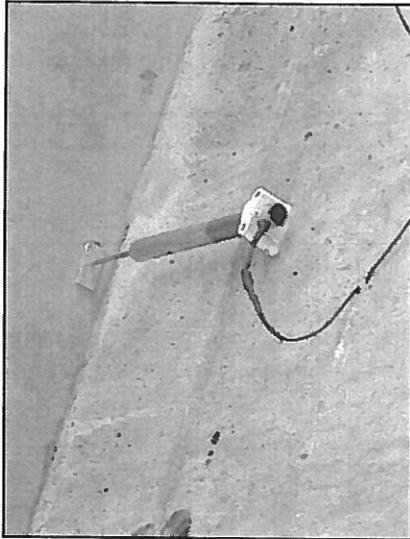


Figura 7: LVDT.

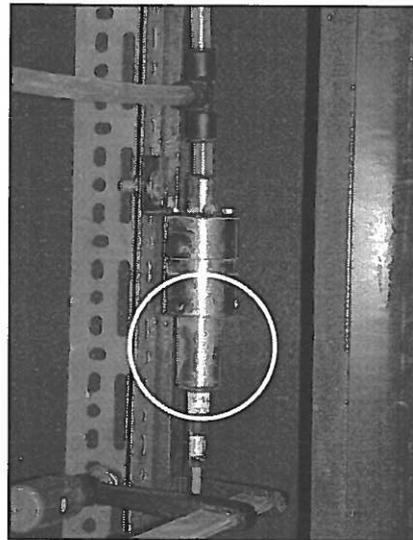


Figura 8: Sensor de pressão.

Na realização do ensaio de carga procurou-se aplicar um sistema integrado que permitisse a medição automática e simultânea destas grandezas, com o mínimo de intervenção de operadores. Consequentemente, todos os transdutores utilizados eram eléctricos e foram reunidos num mesmo sistema de aquisição, localizado num posto de observação (PO) próximo do apoio P5 (ver Figura 3), que em contínuo registou o efeito de passagens sucessivas de veículos pesados sobre o tabuleiro.

4. CONDUÇÃO DO ENSAIO DE CARGA

Para a realização do ensaio de carga foram disponibilizados 6 camiões de três eixos, dois traseiros e um dianteiro, pesando aproximadamente cerca de 31t cada.

Foram definidos 23 casos de carga, em correspondência com outras tantas posições dos veículos imobilizados sobre o tabuleiro, distribuídas por quatro percursos representados na Fig 9.

Nos casos de carga, em que se imobilizaram os veículos sobre o tabuleiro, procuraram obter-se valores máximos de medição para as diversas grandezas observadas e nas várias secções instrumentadas. Os casos de carga

observados foram os seguintes: (i) posições 1A a 1G, com quatro veículos constituindo uma carga centrada no tabuleiro (Fig 10); (ii) os casos de carga 3A a 3G e 4A a 4G, ilustrados nas Figuras 11 e 12 respectivamente, em que foram utilizados apenas dois veículos, posicionados lado a lado no intradorso para o primeiro grupo e no extradorso para o segundo, estacionados nas mesmas posições, constituindo entre si uma acção excêntrica de sinal contrário; (iii) por último as posições 6A e 6B concretizadas por seis veículos, quatro deles alinhados numa dada secção e os outros dois numa outra a 20,0m distância, centrados na secção transversal (Fig 13).

Durante todo o ensaio o sistema de aquisição procedeu à aquisição de sinal em contínuo, com intervalo entre aquisições de 5 segundos. Em cada posição de carga definida os veículos ficaram imobilizados cerca de 4 minutos. No início e no fim de cada um dos percursos realizaram-se leituras com a estrutura sem a carga dos veículos, por forma a despistar o efeito da variação da temperatura sobre a estrutura e o próprio sistema de medição.

5 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Uma vez que a medição foi realizada em contínuo no decurso do ensaio, foi possível visualizar graficamente a evolução das diversas grandezas medidas. Para cada uma

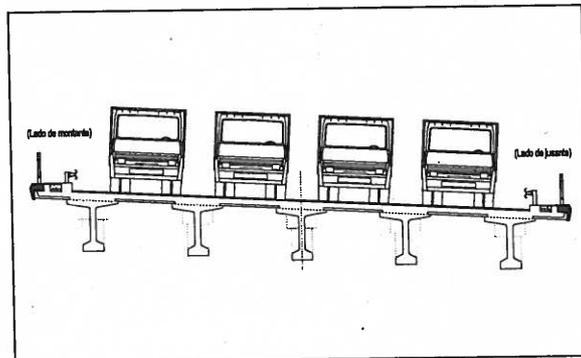
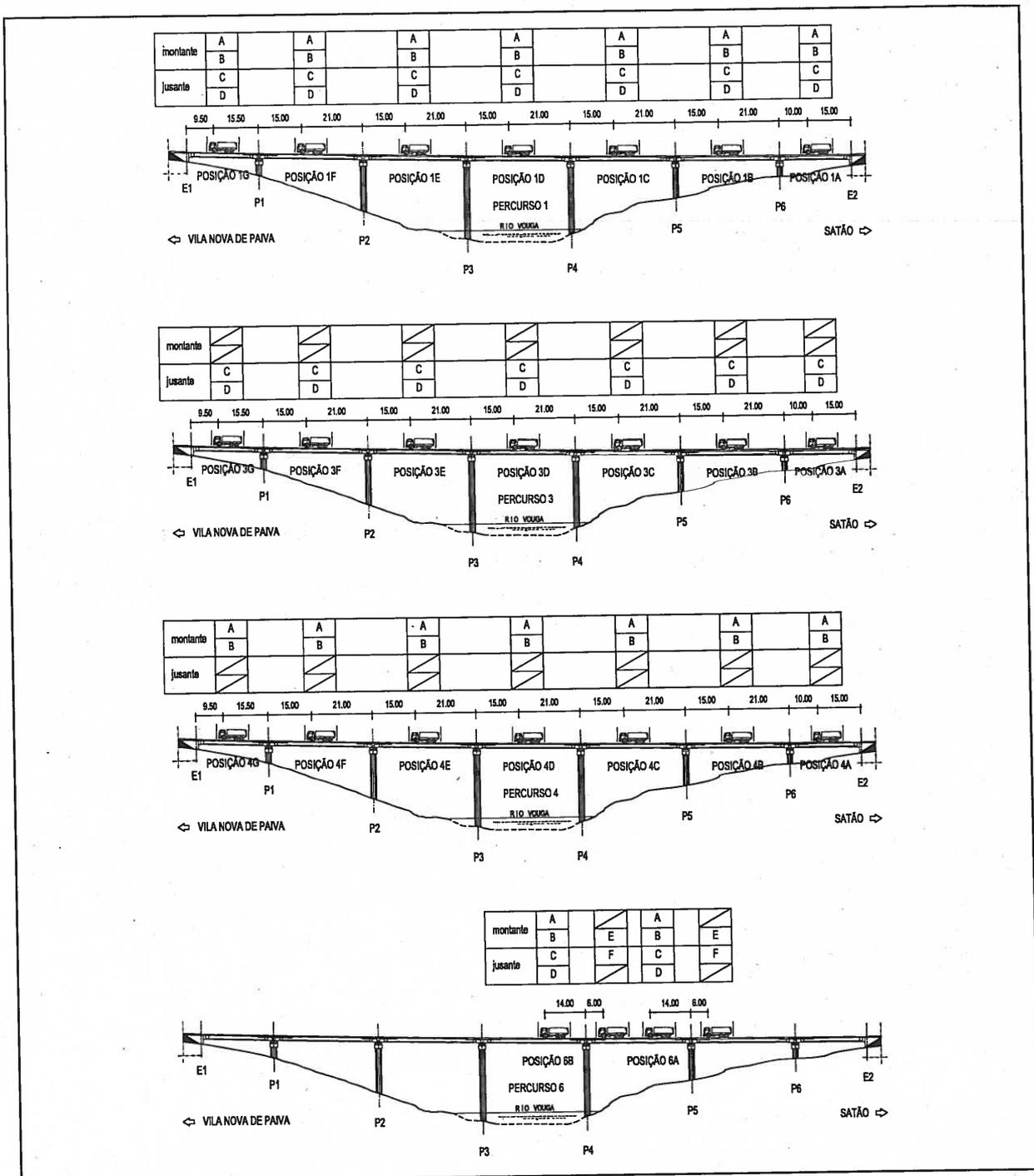


Fig 10: Veículos na posição de carga 1D.

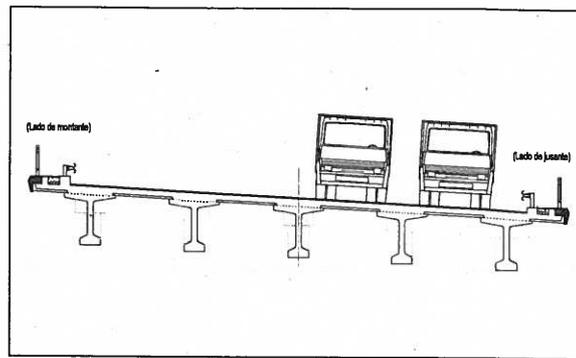


Fig 11: Veículos na posição de carga 3B.

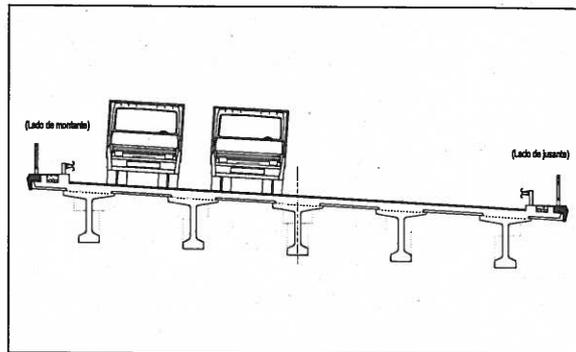


Fig 12: Veículos na posição de carga 4B.

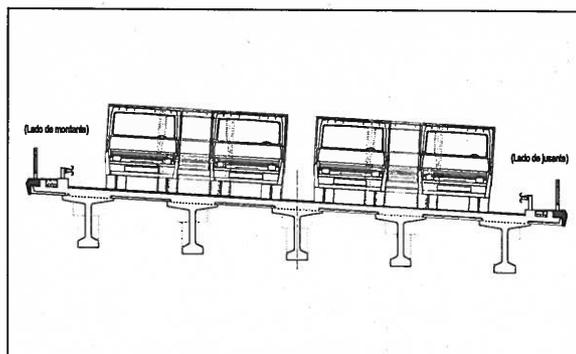


Fig 13: Veículos na posição de carga 6B.

das fases relevantes do ensaio, foi feito um estudo estatístico da informação recolhida e corrigidos os valores de referência, com vista à obtenção do valor de medição de cada sensor para cada caso de carga. A Fig 14 ilustra o valor das flechas medidas em diversos percursos.

A variação das deformações numa das secções instrumentadas do tabuleiro e as rotações experimentadas ao longo do ensaio sobre os pilares P4 e P5 podem ser observadas nas Figuras 15 e 16 respectivamente.

6. ANÁLISE NUMÉRICA

6.1. Modelos Numéricos

Com o intuito de preparar convenientemente o ensaio de carga, no que diz respeito à escolha da aparelhagem utilizada, dos métodos de colocação em obra e eleição das zonas a instrumentar, foram elaborados quatro modelos numéricos tridimensionais para análise do comportamento estrutural, que permitiram avaliar qualitativa e quantitativamente as grandezas mecânicas expectáveis face às solicitações a introduzir durante o ensaio⁽³⁾.

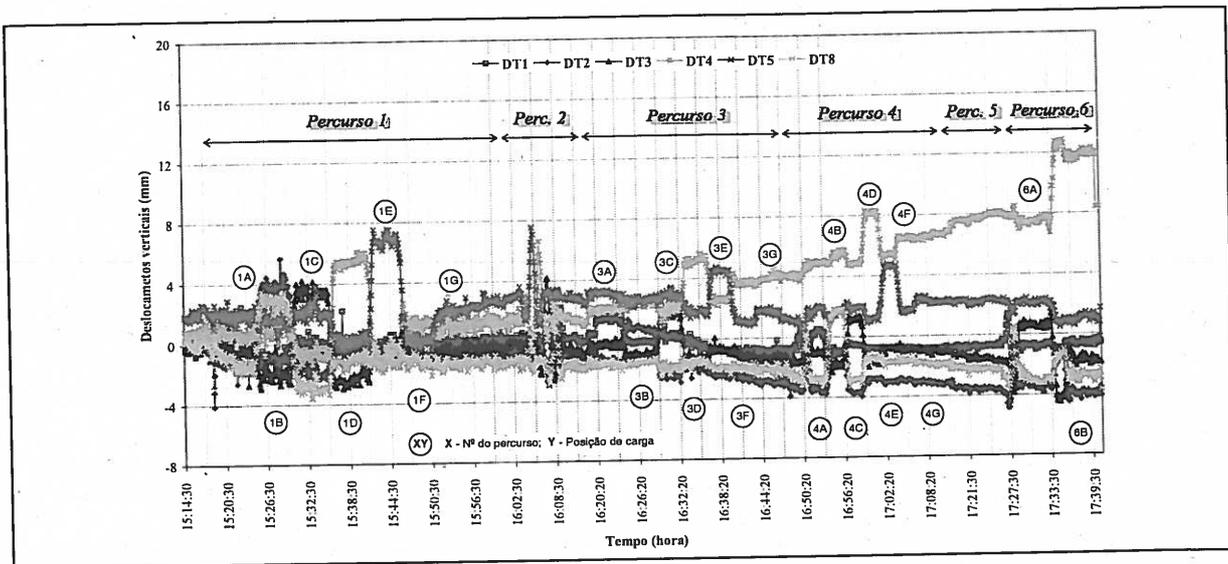


Fig 14: Deslocamentos verticais dos tramos 3 a 7 do tabuleiro: DT1 a DT5 e DT8.

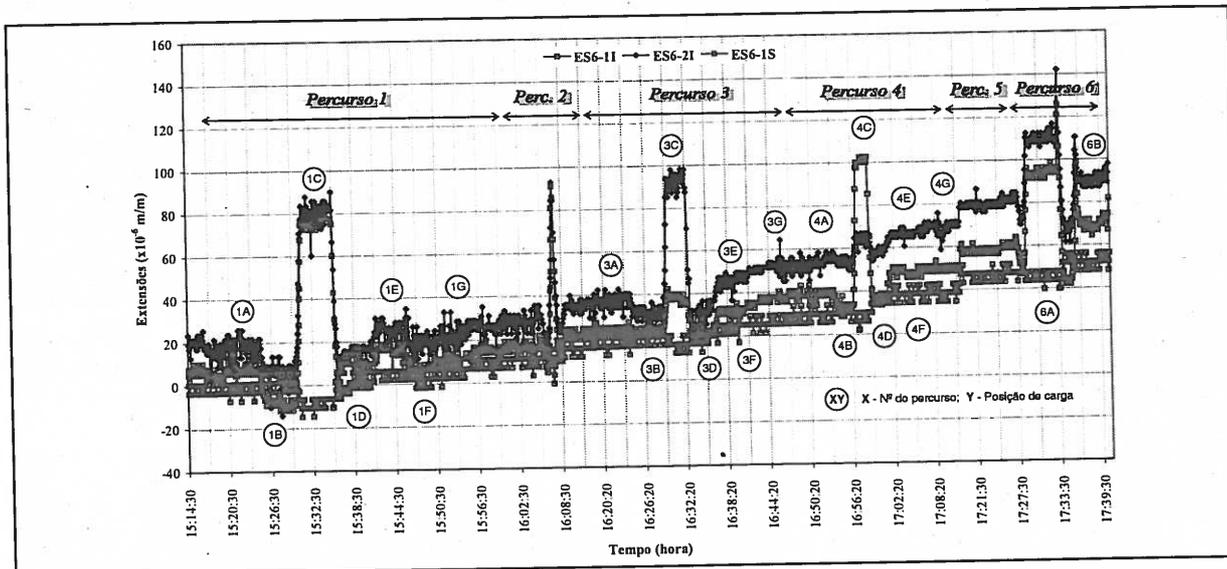


Fig 15: Deformações experimentadas pelo tabuleiro na secção S6: ES6-1I, ES6-2I e ES6-1S

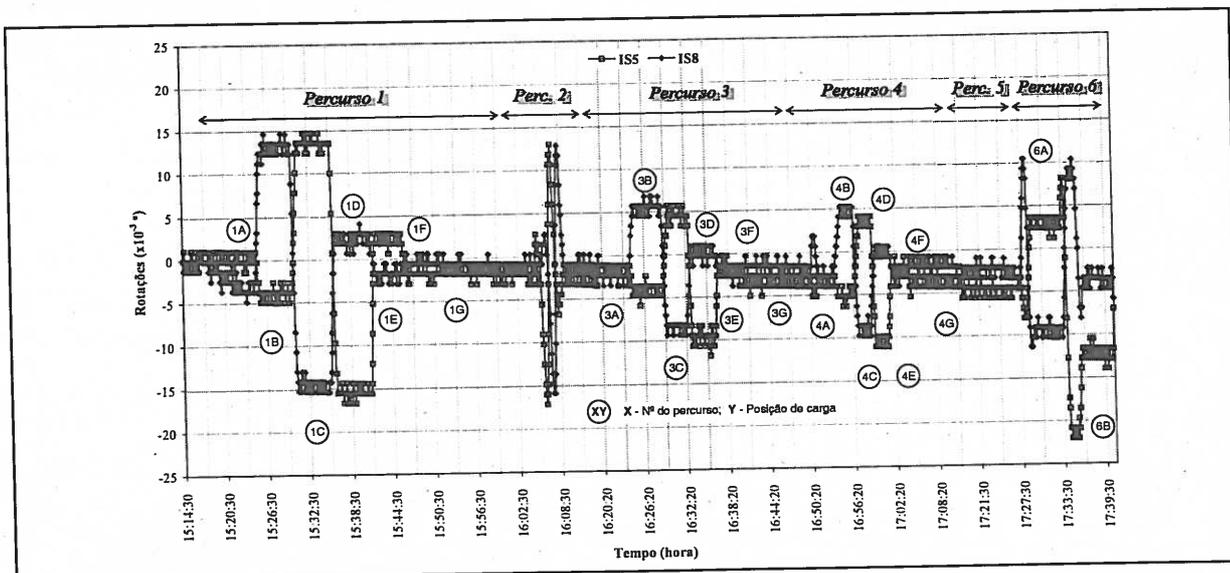


Fig 16: Rotações do tabuleiro nas secções S5 e S8: IS5 e IS8

Por outro lado, estes modelos numéricos permitiram a interpretação dos resultados de observação numa fase posterior à experimentação, possibilitando a detecção de eventuais anomalias na estrutura e o estudo de eventuais correcções a introduzir na mesma.

As características geométricas utilizadas para definir os elementos estruturais, foram obtidas do projecto de execução da solução variante, assim como as características de resistência e deformabilidade dos materiais⁽⁴⁾. Para qualquer um dos modelos, a laje do tabuleiro foi modelada com elementos finitos de membrana, as vigas pré-esforçadas com elementos de barra, assim como os pilares e vigas de encabeçamento que conferem apoio ao tabuleiro.

As principais diferenças entre os vários modelos reside na forma como foi considerada a geometria da directriz da obra de arte e a inclinação transversal do tabuleiro, e como foram quantificadas a rigidez à torção das vigas pré-esforçadas e a espessura da laje. No primeiro, designado de M1, o eixo do tabuleiro é tido como absolutamente recto e de cota fixa sem qualquer inclinação transversal; o modelo M2, ilustrado na Fig 17, descreve de forma muito aproximada não só a geometria curva da directriz da via, mas também a inclinação transversal do tabuleiro e o espessamento da laje junto aos apoios, devido ao facto de as vigas serem lineares e a rasante côncava. Por último, os modelos M3 e M4 diferem do modelo M2 nos

valores assumidos da rigidez à torção das vigas e na espessura da laje, respectivamente, com incrementos de 25%.

A análise realizada pelos modelos é elástica linear, partindo do principio que os níveis de carga a aplicar à estrutura durante a realização do ensaio, encontram-se muito distantes da sua carga última e afastados de níveis de fissuração passíveis de induzir comportamento não-linear significativo.

6.2. Interpretação de resultados da análise numérica

O Quadro 1 apresenta os resultados dos esforços máximos obtidos utilizando os modelos M1 e M2 em 3 acções distintas, nomeadamente as aplicadas durante o ensaio de carga e as geradas pelas sobrecargas regulamentares⁽⁵⁾ (veículo tipo e sobrecarga). Comparando os esforços máximos obtidos, constata-se que o nível de sobrecarga introduzido durante o ensaio corresponde a cerca de 60% do preconizado pelas combinações raras ($\psi_1 = 1$), sendo ainda assim superior em 50% ao estabelecido pelas combinações frequentes ($\psi_1 = 0,4$).

Observando os quadros dos deslocamentos verticais (Quadro 2), das deformações (Quadro 3) e das rotações (Quadro 4), que melhor caracterizam o comportamento da estrutura, verifica-se que as grandezas medidas experimentalmente são em média inferiores em 19% aos obtidos pelo modelo elástico mais rígido.

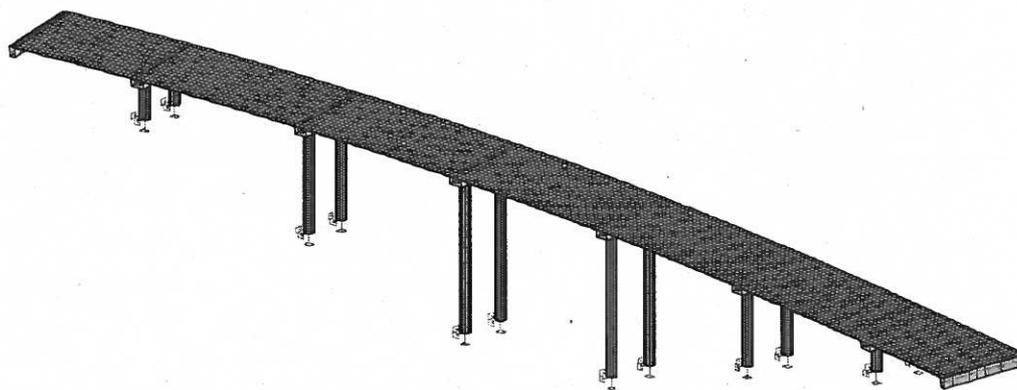


Fig 17: Modelo numérico M2

Quadro 1: Esforços máximos nos meios vãos da viga central para os modelos M1 e M2

POS.	Carga de ensaio		Veículo tipo		Sobrecarga	
	M1 (kN.m)	M2 (kN.m)	M1 (kN.m)	M2 (kN.m)	M1 (kN.m)	M2 (kN.m)
1A	1179,3	1239,4	1363,9	1433,5	1920,2	2018,1
1B	1464,4	1534,7	1469,7	1540,2	2437,0	2554,0
1C	1492,5	1565,6	1520,0	1594,5	2647,0	2776,7
1D	1495,2	1565,5	1484,8	1554,6	2709,7	2837,1
1E	1492,8	1561,5	1519,9	1589,8	2661,7	2784,1
1F	1463,9	1540,0	1469,4	1545,8	2536,2	2668,1
1G	1239,1	1298,6	1329,2	1393,0	2052,3	2150,8

Quadro 2: Deslocamentos verticais nos vãos (mm)

POSIÇÃO/SENSOR	Modelo M1	Modelo M2	Modelo M3	Modelo M4	Ensaio
1A / DT1	3,2	2,9	2,9	2,7	2,1
1B / DT2	6,6	5,8	5,8	5,4	4,2
1D / DT4	6,3	6,1	6,1	5,7	4,4
1E / DT5	6,3	6,1	6,1	5,6	4,4
1B / DT8	4,8	3,7	3,8	3,7	3,1
3A / DT1	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4
3B / DT2	3,2	2,9	2,9	2,7	2,1
3C / DT3	3,2	3,0	3,0	2,8	2,5
3D / DT4	3,0	3,1	3,1	2,8	2,1
4C / DT3	3,4	3,0	3,0	2,8	2,1
4D / DT4	3,3	3,0	3,0	2,8	2,4
4E / DT5	3,2	3,0	3,0	2,8	2,3
4B / DT8	4,7	3,6	3,6	3,6	3,5
6B / DT4	4,1	4,0	4,0	3,8	3,6

Quadro 3: Deformações na secção S6: transdutores ES6-1I e ES6-2I ($\times 10^{-6}$ m/m)

POSIÇÃO/SENSOR	Modelo M1	Modelo M2	Modelo M3	Modelo M4	Ensaio
1C / ES6-1I	91,0	88,6	88,5	84,6	65,7
3C / ES6-1I	17,7	13,5	13,5	15,0	8,6
4C / ES6-1I	73,4	75,1	74,9	69,7	57,3
1C / ES6-2I	88,1	83,2	83,1	79,6	57,2
3C / ES6-2I	69,1	70,6	70,4	65,3	46,7
4C / ES6-2I	19,0	12,7	12,7	14,2	3,3

Quadro 4: Rotações nas secções S5 e S8 ($\times 10^{-3}$ °)

POSIÇÃO/SENSOR	Modelo M1	Modelo M2	Modelo M3	Modelo M4	Ensaio
1B / IS8	20,6	18,9	18,8	17,5	13,7
1C / IS5	20,9	19,3	19,3	17,9	14,3
1C / IS8	-19,9	-18,4	-18,4	-17,1	-13,9
1D / IS5	-19,8	-18,5	-18,5	-17,2	-14,6
3B / IS8	10,0	9,2	9,2	8,5	6,9
3C / IS5	10,1	9,5	9,5	8,8	6,8
3C / IS8	-9,6	-9,1	-9,0	-8,4	-7,0
3D / IS5	-9,6	-9,1	-9,1	-8,5	-6,9
6A / IS5	12,1	10,8	10,8	10,0	10,8

Quadro 5: Parâmetros modais calculados e identificados

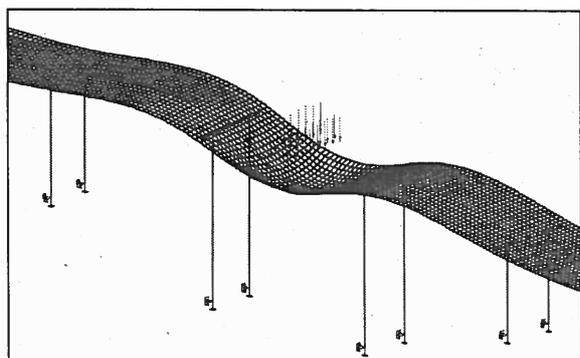
Frequência calculada (Hz)	Frequência identificada (Hz)	Tipo de modo
2,86	3,12	1º vertical
3,32	3,56	2º vertical
3,99	4,32	3º vertical

Neste tipo de solução estrutural quer a densidade de armaduras passivas quer a quantidade de pré-esforço são apreciáveis e o seu contributo para a rigidez da peça é significativo. No exemplo em apreço este acréscimo, que foi estimado em 10%, não foi contemplado pelos diversos modelos, porque apenas se considerou a secção bruta de betão. Esta correcção acarretaria uma redução dos valores das grandezas obtidos nos vários modelos na mesma proporção do acréscimo de rigidez. Deste modo, a real divergência entre os resultados obtidos no ensaio e os do modelo M4 corrigido rondaria os 9%, valor bastante satisfatório, e que pode ficar a dever-se a possíveis restrições adicionais nos apoios e alterações do módulo de elasticidade do betão.

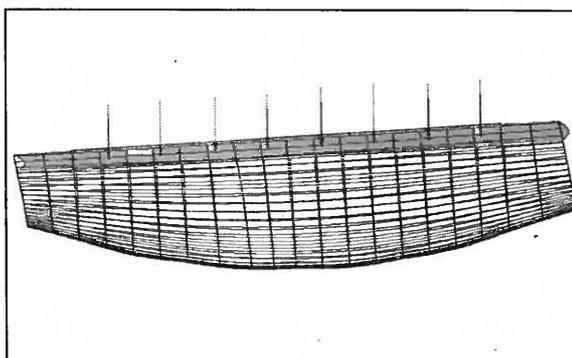
Estas considerações são corroboradas pelos resultados do ensaio de vibração ambiental, realizado pelo Laboratório de Vibrações e Monitorização de Estruturas (VIBEST) da FEUP⁽⁶⁾. O Quadro 5 resume a comparação entre as frequências naturais relativas aos modos globais mais relevantes de flexão vertical, calculadas com o modelo M4 e identificadas em obra. Conclui-se que o grau de correlação existente é satisfatório, apontando para uma diferença de rigidez à flexão do tabuleiro de 17%.

Face ao exposto conclui-se que as cargas introduzidas durante o ensaio não induziram, em principio, fissuração/fendilhação generalizada nas vigas de betão armado pré-esforçado, pois de outro modo seria de prever que os valores medidos fossem superiores aos obtidos pelos modelos elásticos. A consideração de que o modelo M4 é o mais representativo do comportamento da estrutura é perfeitamente admissível, porque a betonagem de lajes com inclinação acentuada conduz na maior parte dos casos a incrementos de espessura que podem chegar aos 5 cm em relação ao definido no projecto.

Por outro lado, da comparação dos vários valores obtidos numericamente constata-se que a simplificação da geometria aporta um erro na análise que ronda os 7%, pelo que o seu contributo para a diferença entre a análise numérica e a observação não é tão significativo como se poderia supor à partida, muito embora transversalmente a diferença de cotas entre extremidades do tabuleiro atinja mais de 1m. Tal fica a dever-se ao facto de que embora o tabuleiro sofra flexão desviada, o eixo de flexão principal seja praticamente paralelo à laje deformando-se perpendicularmente a esta, conforme é possível observar na Fig 18.



a) Vista geral.



b) Vista transversal do vão central.

Fig 18: Deformada obtida no modelo M4 para a posição de carga 1D.

Importa ainda referir que das diversas análises efectuadas claramente se comprova o papel primordial que desempenha a laje entre vigas pré-esforçadas na distribuição transversal da carga, por flexão e sobretudo corte, contrastando com a influência mínima que a rigidez à torção das vigas pré-esforçadas tem neste fenómeno, conforme se constata nas diferenças de resultados obtidos pelos três últimos modelos.

7. AGRADECIMENTOS

A observação do comportamento da Ponte sobre o Rio Vouga na EN 239 durante o ensaio de carga foi da responsabilidade do LABEST por solicitação do Adjudicatário, Ramalho Rosa / Cobetar, S.A., a quem agradecemos toda a cooperação e disponibilidade durante todo o processo. Agradece-se também à Agência de Inovação (AdI) pelo financiamento da bolsa de investigação do primeiro autor, no âmbito do Projecto SMARTE.

8. REFERÊNCIAS

- (1) Batista, A. L. – Parecer sobre a Aplicação do Pós-esforço. Lisboa, Outubro, 2002.
- (2) Félix, C. et al. – Monitorização do Comportamento da Ponte Luiz I durante o Ensaio de Carga. Estruturas 2002, LNEC, Jul. de 2002.
- (3) Afonso Costa, B. J. et al. – Instrumentação e Observação do comportamento da Ponte sobre o Rio Vouga durante o Ensaio de Carga. Relatório Técnico. DEC, FEUP, Março de 2003.
- (4) EN 329: Ponte sobre o rio Vouga. Projecto de Execução - Solução Variante. BETAR Consultores Lda., Abril, 2001.
- (5) RSA: Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto-Lei nº 235/83, 1998
- (6) Magalhães F.; Caetano E.; Cunha A. – Ensaio de vibração ambiental da Nova Ponte sobre o Rio Vouga na EN 329. Relatório. DEC, FEUP, Maio. de 2003.

