

# ENSAIOS EXPERIMENTAIS - VIADUTO DO CORGE

Silva, L. A. P. S.<sup>1</sup>; Jordão, S. F. S.<sup>2</sup>; Kowalczyk, R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

<sup>2</sup> Assistente Estagiária do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior



## RESUMO

*Ensaio experimentais de extensometria e deflexão foram realizados no Viaduto do Corge, - Linha da Beira Baixa Km 168. Apresenta-se o processual do ensaio a nível de preparação e execução e bem assim os resultados, seu tratamento e conclusões relevantes. Os resultados obtidos são utilizados na calibração de um modelo numérico de elementos finitos do viaduto.*

## 1 - INTRODUÇÃO

O gradual aumento das solicitações dos comboios a nível de velocidade e das exigências a nível do conforto dos passageiros, não são compatíveis com a vida de serviço demasiadamente longa de algumas pontes dos Caminhos de Ferro Portugueses. Com vista a obter informação quanto ao real comportamento de uma dessas pontes e estudar eventuais técnicas inovadoras de adaptação das suas capacidades às novas exigências de circulação, realiza-se um estudo aprofundado que permita obter um modelo da estrutura real tão fidedigno quanto possível. Para tal realiza-se um modelo numérico tridimensional, posteriormente calibrado através de resultados de ensaios experimentais "in situ".

## 2 - ESTRUTURA E MODELO

Trata-se de uma ponte ferroviária de 1889 pertencente à Linha da Beira Baixa. A estrutura é metálica (ferro de pudragem),

tipo treliça, com quatro tramos contínuos apoiada em pilares de alvenaria.

O modelo numérico realizado é tridimensional. Os elementos utilizados na modelação são elementos de viga com seis graus de liberdade por nó, e as ligações são consideradas rígidas.

## 3 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 - Introdução

Ensaio de extensometria eléctrica e de deflexão foram realizados. O objectivo geral seria obter valores que permitissem a calibração do modelo numérico. Concomitantemente pretendia-se uma análise mais específica que fornecesse um melhor conhecimento da estrutura, para mais facilmente realizar a calibração, actuando sobre os parâmetros relevantes. Esta análise pretendia: Conhecer o tipo e magnitude dos esforços em cada elemento tipo da estrutura, averiguar de efeitos parasitas não esperados teoricamente e averiguar o grau de rigidez das ligações.

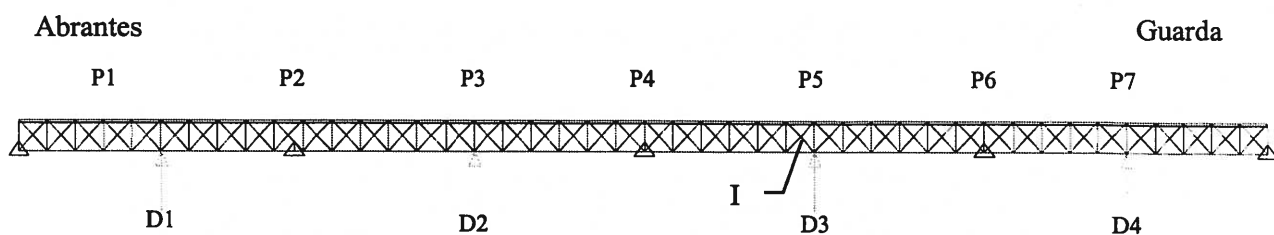


Fig. 1 - Esquema da ponte com as posições do comboio durante o ensaio ( $P_i$ ), a zona instrumentada (I) e as posições dos deflectómetros ( $D_i$ ).

A zona instrumentada é um elemento modular da estrutura junto ao meio de um dos tramos de maior vão, por forma a obter resultados mais significativos. No que diz respeito aos ensaios de deflexão, utilizaram-se quatro pontos de medição que correspondem ao meio de cada tramo.



Fig. 2 - Comboio sobre a ponte durante o ensaio

### 3.2 - Preparação

#### 3.2.1 - Extensometria

Cada secção tipo da estrutura na zona do vão foi analisada tendo em vista o cumprimento dos objectivos supracitados. Por forma a não aumentar demasiado o número de extensómetros utilizados, foram colocados apenas dois em cada secção tipo, permitindo avaliar o esforço axial e averiguar da existência de alguma flexão segundo a direcção mais provável. Em excepção a este procedimento, instrumentou-se uma das vigas principais com quatro extensómetros, visto aí a flexão lateral poder tomar valores significativos. Apresenta-se na coluna seguinte um esquema com a posição dos extensómetros na zona instrumentada. A ligação foi realizada em quarto de ponte a

três fios, de forma a compensar o efeito da temperatura e do aumento da resistividade devido aos comprimentos relativamente longos dos cabos.

O cabo de condutores era envolvido em malha metálica e protegido por um invólucro de PVC, de forma a minimizar a influência electromagnética exterior, nomeadamente a provocada pelas máquinas em movimento, e a proteger o melhor possível a integridade do cabo.

O posicionamento do cabo teve em conta o maior afastamento possível da linha e a protecção de vento e da exposição solar.

O equipamento de tratamento e aquisição de dados era composto por uma ponte automática de 10 canais e uma caixa de extensões com 50 canais. Foi colocado no topo de um dos pilares contíguos ao tramo ensaiado. A escolha do local prendeu-se com o facto de conduzir a um menor comprimento do fio, ser estável, afastado da linha e apresentar boas condições para a operação do equipamento.

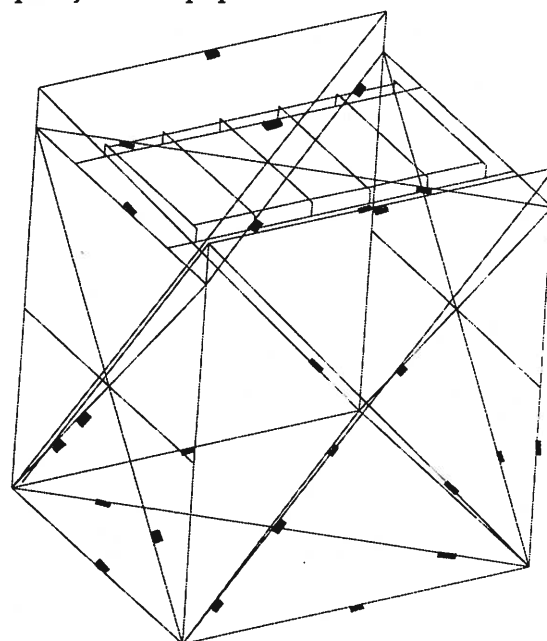


Fig. 3 - Esquema da disposição dos extensómetros no elemento modular instrumentado

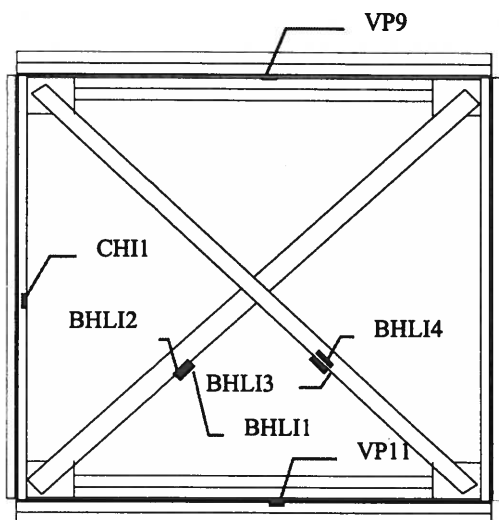


Fig. 4 - Posição dos extensómetros vista longitudinal horizontal inferior. Idêntica à realizada para a vista superior.

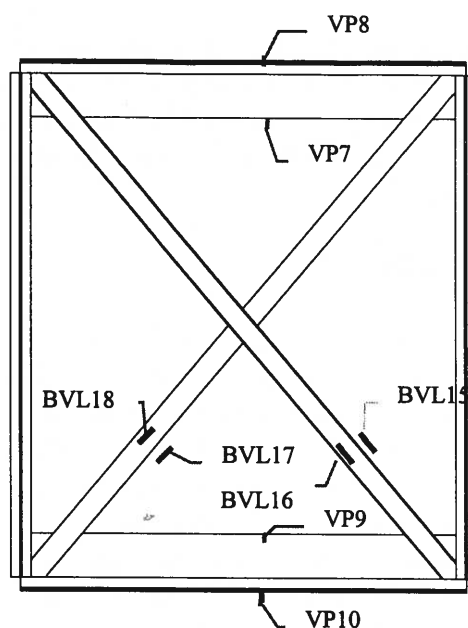


Fig. 5 - Posição dos extensómetro vista longitudinal vertical, lado da Covilhã. Idêntica à realizada do lado da Guarda.

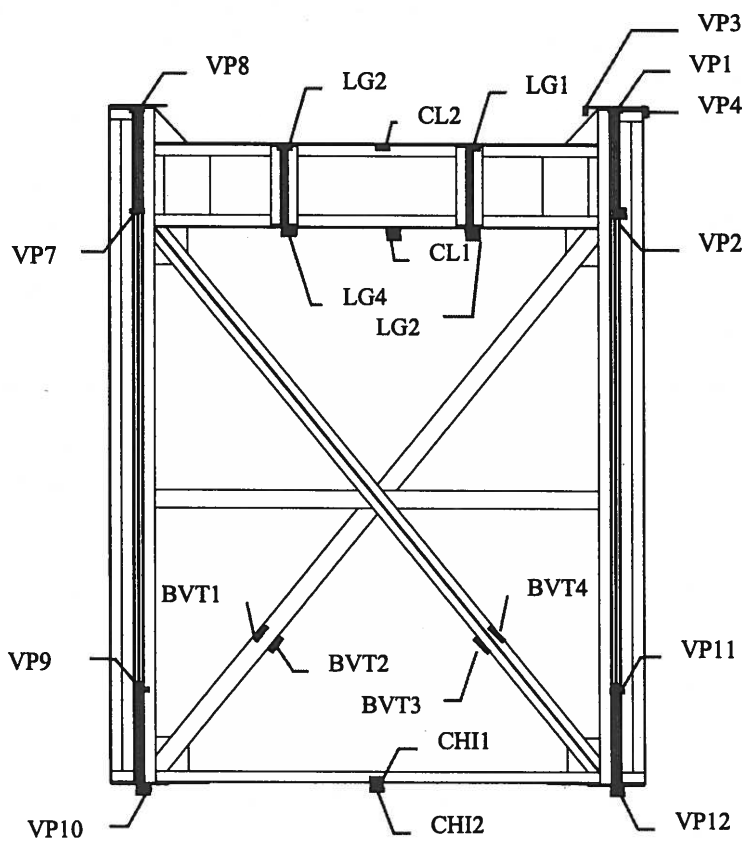


Fig. 6 - Posição dos extensómetros vista transversal

**Legenda:**

VP Viga Principal

VP-T Viga Principal

LG Longarina

CL Carlinga

BVL Biela Vertical em Plano Long.

BVT Biela Vertical em Plano Transversal

BHLS Biela Horizontal Longitudinal Superior

BHLI Biela Horizontal Longitudinal Inferior

CHI Contraventamento Horizontal Inferior

MCO Montante Comum

A ligação à terra foi realizada com fio condutor de cobre com 3,5mm, desde o data logger até uma estaca metálica a 2m de profundidade no leito da ribeira sob o viaduto.

### 3.2.2-Deflexão

Do meio de cada vão, na zona de contraventamento horizontal transversal inferior, suspenderam-se fios de arame tipo corda de piano com 3mm de diâmetro. As medições foram realizadas junto ao solo em bases fixas. O fio é mantido esticado por intermédio de um tripé carregado. Foram utilizados deflectómetros manuais.

### 3.3 - Execução

Como solicitação foi utilizada uma locomotiva da CP, Diesel Eléctrica - M.L.W. da Série 1551 a 1570 com 90 ton. O ensaio iniciou-se com a locomotiva estacionada fora da ponte (lado de Abrantes) e a inicialização de todos os instrumentos de medição. Em seguida a locomotiva iniciou a sua marcha para o extremo do lado da Guarda. Em cada meio vão e sobre cada apoio a locomotiva imobilizou-se, aguardaram-se alguns instantes para estabilização dos instrumentos e realizaram-se as medições. A máquina imobiliza-se fora da ponte(lado da Guarda) e reinicializam-se os equipamentos de medição. A locomotiva avança de novo em direcção a Abrantes e repete-se o processo, obtendo

assim valores de confirmação.

## 3.4 - Resultados

### 3.4.1 - Tratamento de dados

O tratamento dos dados é um conjunto de procedimentos que permite obter, através dos valores registados nos equipamentos de medição, os valores que serão tidos como resultados experimentais.

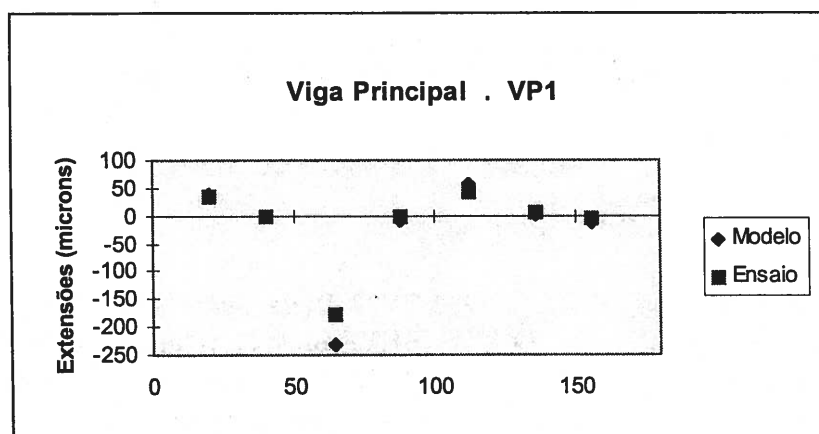
A primeira fase do tratamento de dados constou de uma análise crítica dos valores obtidos por forma a excluir de imediato os valores desenquadrados. Em seguida, no caso do ensaio de deflexão realizou-se a média dos valores obtidos em ambas as passagens, e no caso do ensaio de extensometria retiraram-se às leituras de cada passagem os valores residuais finais, e fez-se a média dos valores obtidos para cada uma delas.

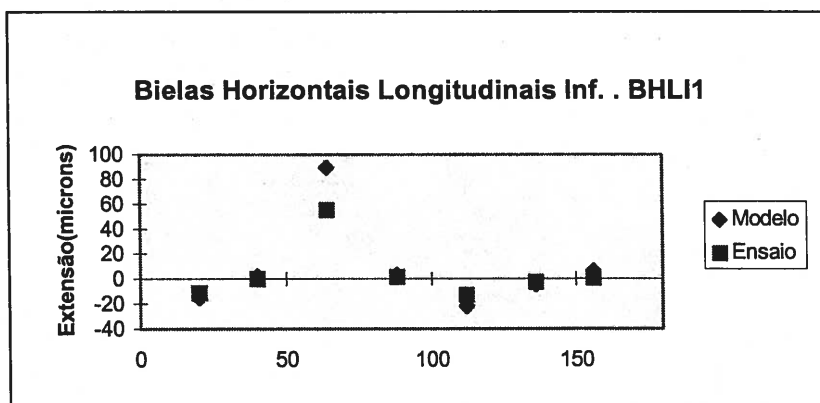
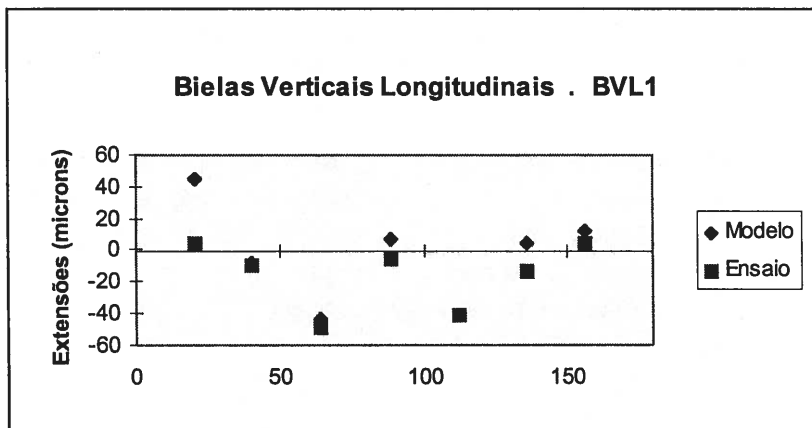
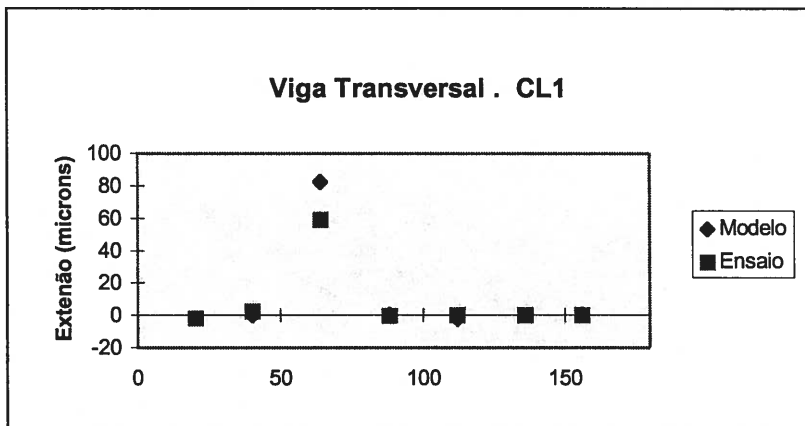
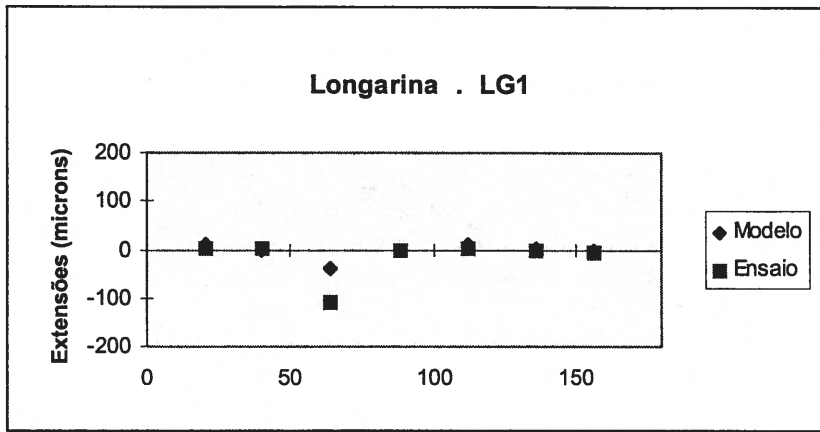
### 3.4.2 - Extensometria

Apresentam-se nos gráficos seguintes os valores recolhidos no ensaio experimental e também os valores obtidos no cálculo automático para o modelo da ponte e um carregamento correspondente ao do ensaio. Cada ponto do gráfico corresponde a cada uma das posições do comboio durante o ensaio.(esquema da figura 1)

Apresenta-se apenas um gráfico por cada secção transversal tipo, visto ser análogo o comportamento em cada uma delas.

Nomenclatura, local dos extensómetros, e posições do comboio, nas páginas 2 e 3.





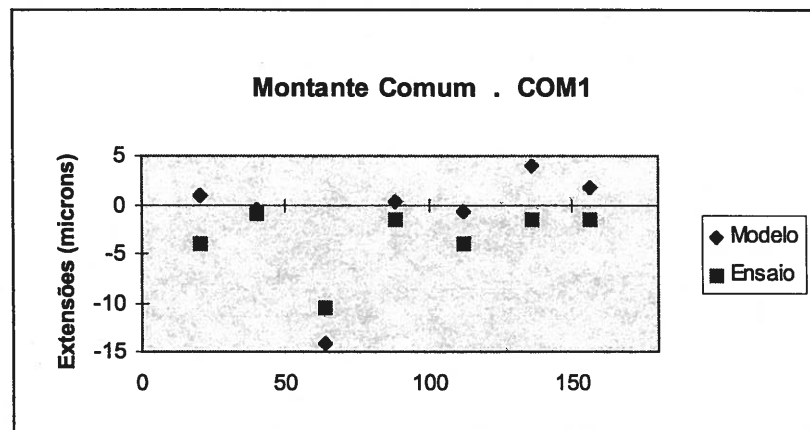
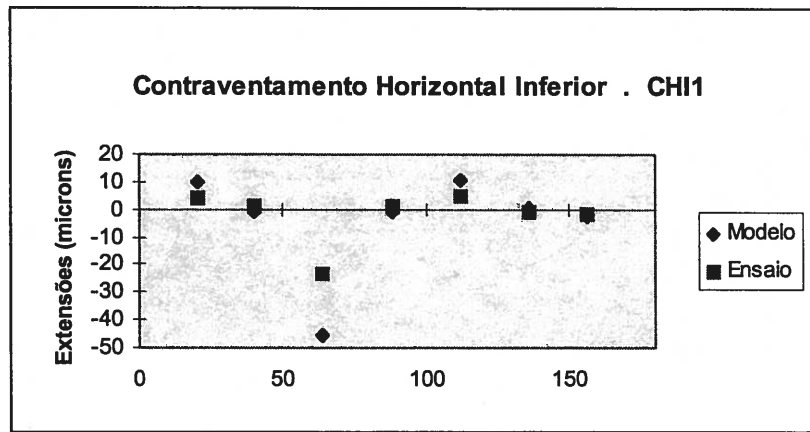


Fig. 7 - Valores recolhidos no ensaio experimental e obtidos no cálculo automático para o modelo da ponte e um carregamento correspondente ao do ensaio.

De uma forma geral pode admitir-se que o ajuste entre os valores calculados e os valores obtidos experimentalmente é bastante razoável. Este ajuste é mais visível nos elementos principais onde os esforços são maiores. De facto nos elementos de contraventamento os esforços são muito reduzidos pelo que o erro relativo é mais expressivo, e pequenas irregularidades têm um peso elevado afastando os resultados do modelo e do ensaio.

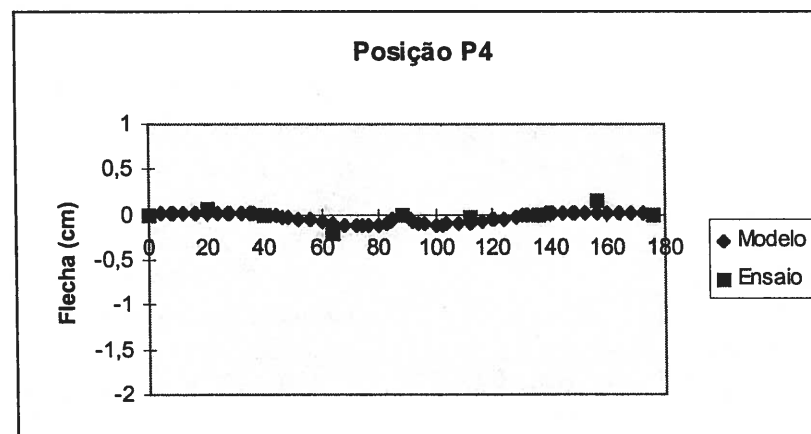
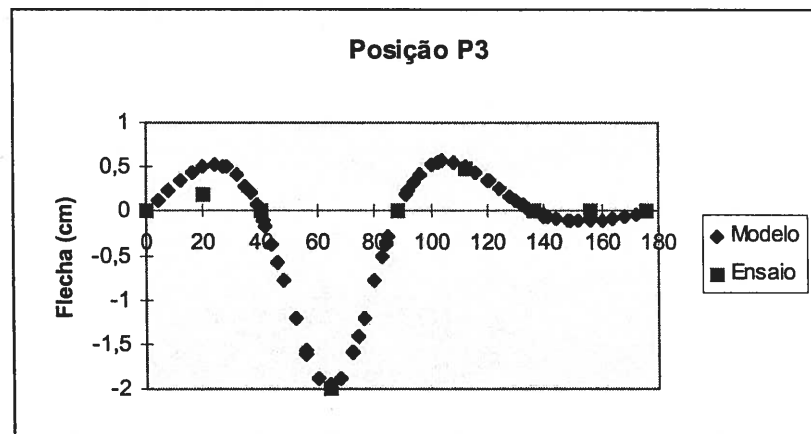
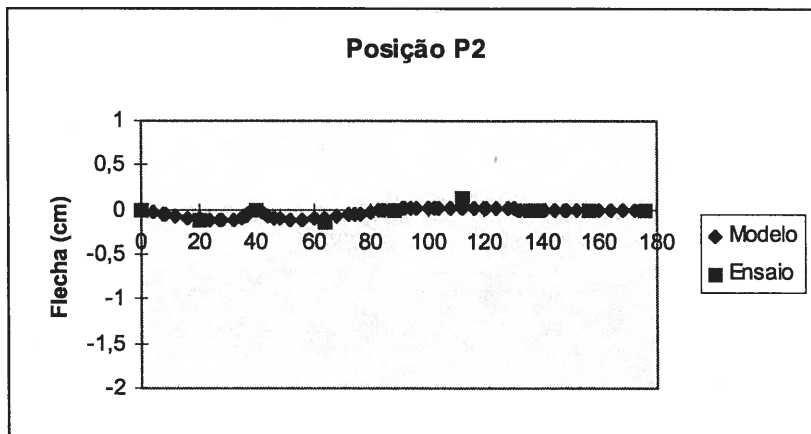
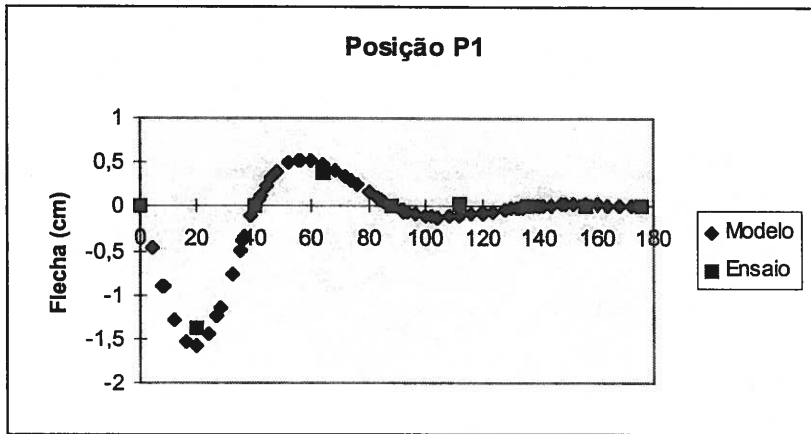
Em alguns pontos obtêm-se valores que se afastam da tendência geral. Este facto pode prender-se com irregularidades no

processo de medição ou com um comportamento não esperado da estrutura devidos por exemplo a fenómenos relativos à sua muito longa vida de serviço.

### 3.4.3 - Deflexão

Os gráficos seguintes representam os valores das flechas da estrutura a meio de cada vão, obtidas para a situação do ensaio experimentalmente e através de cálculo do modelo numérico da estrutura.

Na página 2 expõe-se a nomenclatura e posições relevantes.



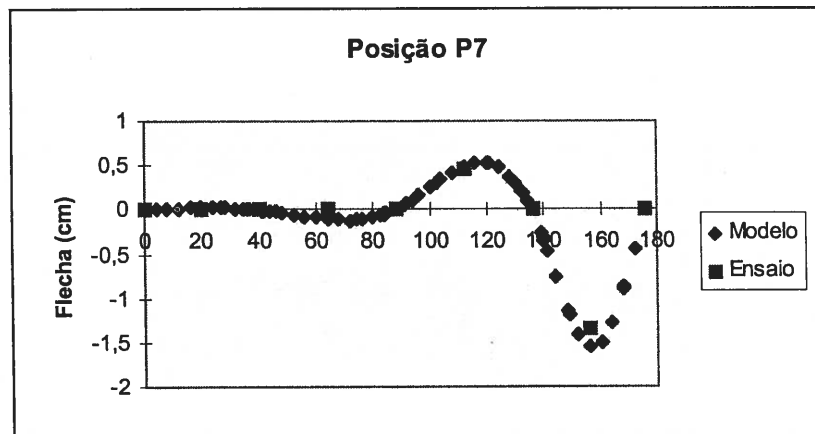
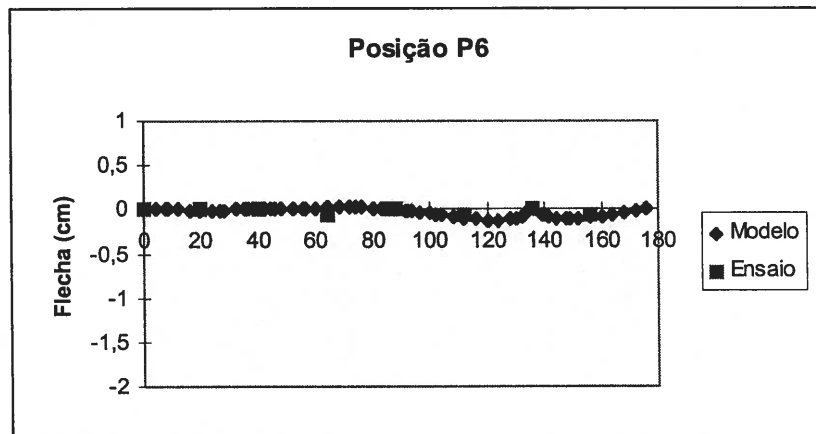
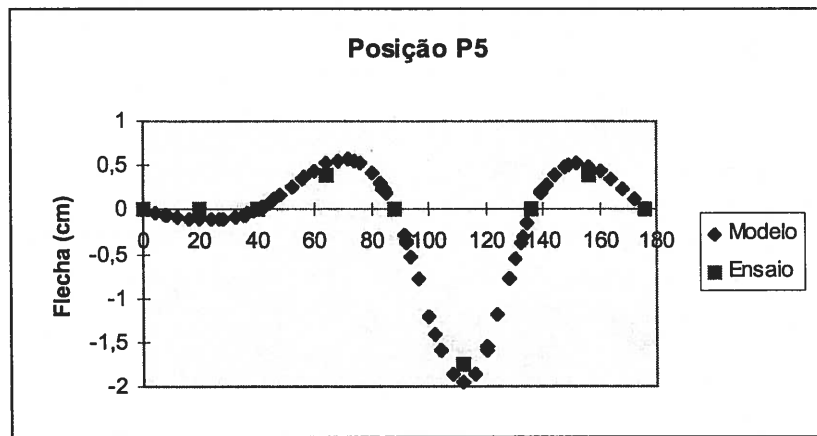


Fig. 8 - Flechas da estrutura obtidas no ensaio e em cálculo.

Os resultados a nível de flechas demonstram igualmente um ajuste razoável do modelo numérico à estrutura real.

#### 3.4.4 - Análise estatística

Pretende-se inferir valores numéricos que permitam uma apreciação mais expedita,

clara e resumida do ajuste existente entre os valores obtidos no ensaio e os resultantes do cálculo automático. Estes valores permitem também avaliar melhor possíveis fontes de erro e eliminar resultados desenquadrados. Os valores a calcular são a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A amostra é obtida dos resultados do



ensaio e do modelo, através de uma fórmula, que adveio dos seguintes pressupostos:

1- Conduzir a uma amostra única a partir dos resultados do ensaio e do modelo, para cada situação em estudo.

2 - Permitir a standardização de resultados, de modo a que em cada amostra cada ocorrência tenha o mesmo âmbito/peso/significado relativamente às outras, e se possa então extrair delas parâmetros estatísticos com significado real. Esta exigência prende-se com o facto de que as amostras consideradas não são valores obtidos pela repetição da mesma situação com invariabilidade de parâmetros. De facto em algumas amostras há variação da posição do comboio, e noutras há variação do extensómetro ou do lugar de medição da flecha.

3 - Deve produzir valores diferentes de zero ou infinito, para valores nulos do ensaio ou do modelo, já que esta situação produziria valores que desvirtuariam os parâmetros estatísticos da amostra onde estivessem inseridos.

Daqui se obtém uma fórmula possível para calcular o valor da amostra única:

$$Amostra \rightarrow x = \frac{(Ensaio - Modelo)}{Modelo}$$

Os parâmetros estatísticos são obtidos para as extensões e as flechas para as seguintes situações. Para as extensões tem-se cada posição do comboio para todos os extensómetros do mesmo tipo. Para as flechas tem-se cada posição do comboio em todas as posições de medição.

Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos para facilitar a sua interpretação.

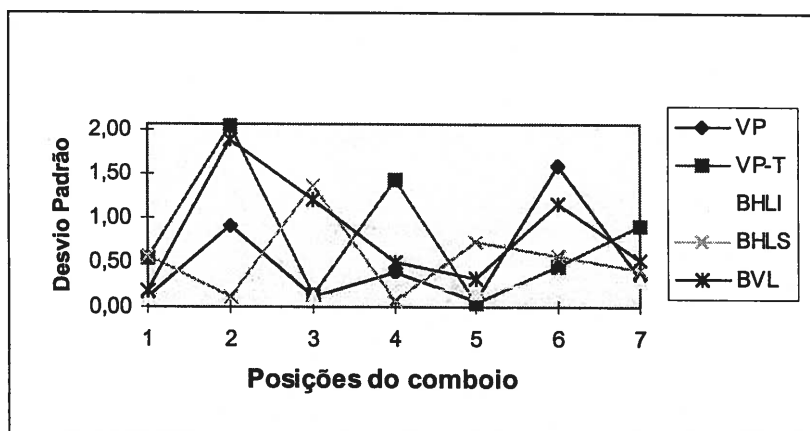
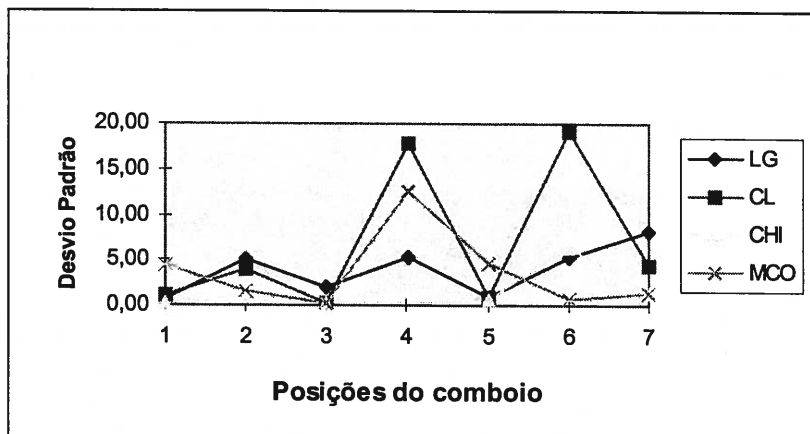


Fig. 9 - Desvio padrão dos resultados do modelo em relação aos do ensaio, a nível de extensões, para cada secção tipo.

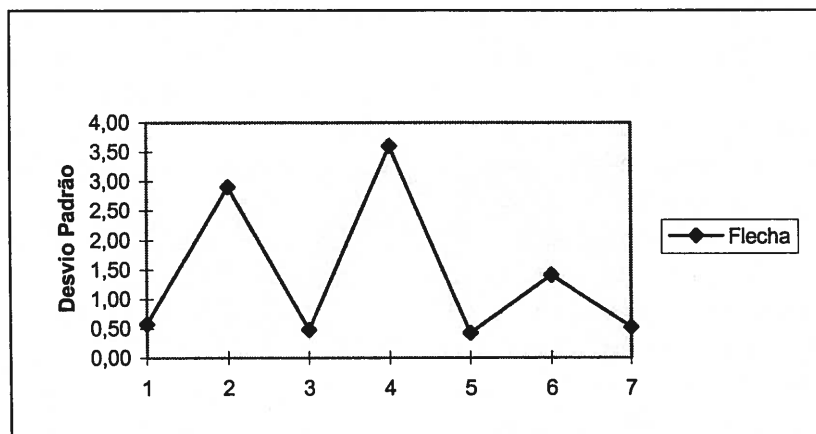


Fig. 10 - Desvio padrão dos resultados do modelo em relação aos do ensaio, a nível de flechas, para cada posição do comboio.

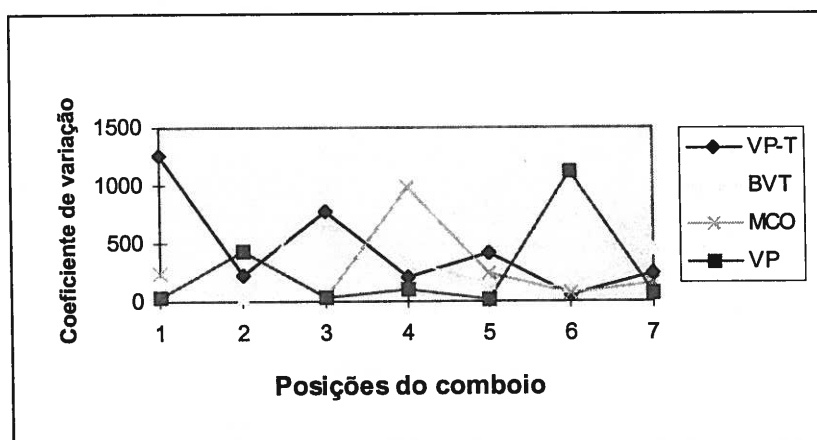
Dos gráficos da figura 9 pode concluir-se que, de um modo geral, o desvio padrão é maior quando o comboio se encontra sobre os pilares do que quando se encontra a meio dos vãos. A explicação poderá prender-se com o facto de que quando o comboio se encontra sobre os pilares os esforços são menores, portanto os erros relativos são mais significativos.

Pode também observar-se que quanto maior é a distância do comboio ao local onde se encontram os extensómetros maior é o desvio padrão. Este facto terá possivelmente a mesma justificação que o anterior, já que nesta situação os esforços também diminuem.

No diz respeito às flechas, há a

mesma tendência para um maior desvio padrão quando o comboio se encontra sobre os pilares, mas esta tendência não é reforçada com a progressão do comboio sobre a ponte porque os pontos de medição das flechas estão distribuídos ao longo desta.

Os gráficos seguintes representam um tipo de parâmetro diferente denominado coeficiente de variação. A sua utilidade tem a ver com o facto de que permite uma comparação entre os desvios das várias amostras, já que representa o desvio padrão como percentagem da média, o que fornece uma medida de variação relativa não dependente de escala da amostra.



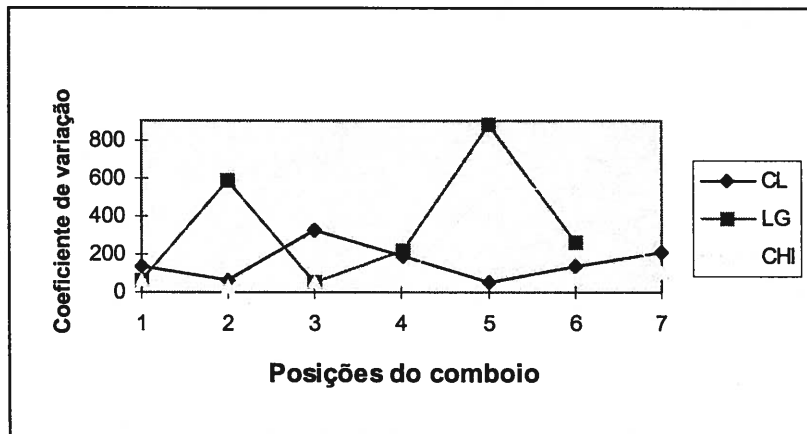
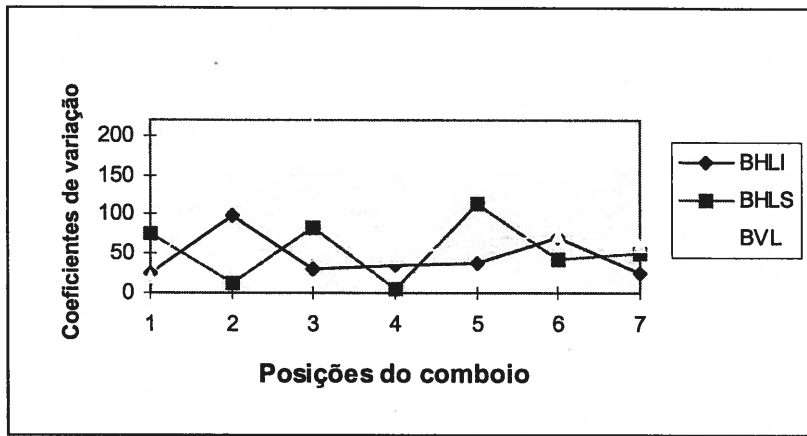


Fig. 11 - Coeficiente de variação dos resultados do modelo em relação aos do ensaio, a nível de extensões, para cada secção tipo.

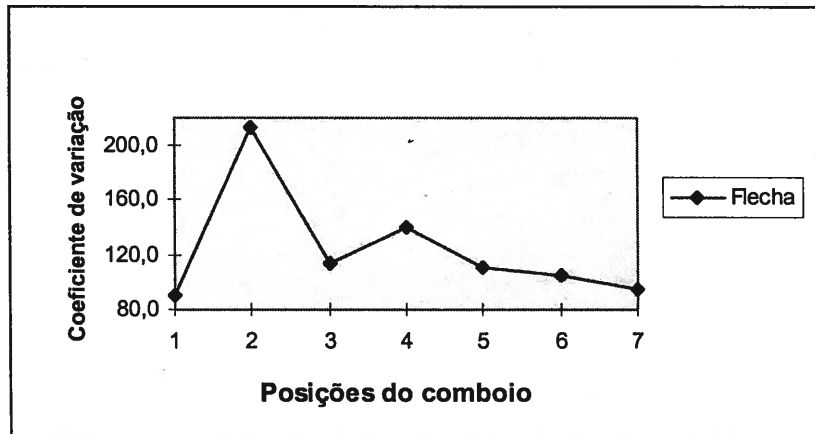


Fig. 12 - Coeficiente de variação dos resultados do modelo em relação aos do ensaio, a nível de flechas

#### 4 - CONCLUSÕES

Os resultados do ensaio experimental ajustam-se consideravelmente bem aos resultados do modelo numérico, ainda que, de uma maneira geral o modelo seja menos rígido que o protótipo. Este ajuste

é mais notório nos locais e situações onde os esforços são maiores. Quando assim não é o cenário de esforços obtidos é de tal maneira reduzido que não se podem considerar esses valores como representativos. Conclui-se então que para os valores obtidos não é necessário

realizar qualquer calibração do modelo. Para um carregamento substancialmente maior poder-se-iam evidenciar mais claramente diferenças entre o modelo e o protótipo, e proceder então a uma calibração mais rigorosa.

## 5 - REFERÊNCIAS

Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses  
Departamento da Via e Obras - Serviço de Obras Metálicas "Determinação Experimental de Tensões em Pontes Metálicas"

F.B. Branco "Análise Experimental de Tensões e Observação de Obras", Universidade de Coimbra, 1995

J.F. Silva Gomes et al. "Recent Advances in Experimental Mechanics" A.A.Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1994  
Irwin Miller et al. "Probability and Statistics for Engineers" Prentice-Hall International Editions, 1990