

## Resumo

O principal objectivo da presente dissertação foi o desenvolvimento de ferramentas para a avaliação de efeitos dinâmicos decorrentes da actuação de cargas de tráfego rodoviário em pontes, quer por via experimental, quer por via numérica. No que se refere à componente experimental do trabalho, os efeitos dinâmicos foram quantificados mediante a utilização de um sistema de medição dinâmica baseado em extensometria eléctrica de resistência. Em relação à componente numérica, a quantificação dos efeitos referidos foi efectuada através de um modelo computacional que permite ter em conta a interacção dinâmica entre a ponte e os veículos e as características da irregularidade do pavimento.

O sistema de medição dinâmica foi aplicado ao estudo dos efeitos dinâmicos de cargas de tráfego rodoviário na ponte Salgueiro Maia. Para o efeito, foi instalado um conjunto de extensómetros de resistência eléctrica na secção de meio vão do tabuleiro, com o objectivo de avaliar não só efeitos de carácter global associados à deformação do tabuleiro mas também de carácter mais local associados à deformação das lajes laterais. Além disso, foram instaladas células de carga nos tirantes para a medição do esforço axial nestes elementos. O sistema de medição foi aplicado nos ensaios de recepção da ponte, os quais consistiram na realização de um ensaio de carga estático, de um ensaio de vibração ambiental e de um ensaio dinâmico sob tráfego controlado. O ensaio de carga estático da ponte foi efectuado de acordo com diversas configurações de carga, utilizando-se para o efeito 20 camiões do tipo articulado com massas de 38-40 t cada. A identificação experimental de parâmetros modais da estrutura foi efectuada através de um ensaio de vibração ambiental preliminar, posteriormente complementado por um ensaio realizado pelo LNEC. O ensaio dinâmico sob tráfego controlado teve como objectivo a avaliação experimental de factores de amplificação dinâmica associados à passagem de camiões carregados do mesmo tipo dos utilizados nos ensaios estáticos circulando a diferentes velocidades e ao longo de diversas vias da faixa de rodagem, isolados ou em grupos. O nível de importância dos efeitos dinâmicos induzidos pelo tráfego foi medido pelos designados factores de amplificação dinâmica (DAFs). Foram avaliados DAFs relativos a extensões, associadas a efeitos de carácter global e local, ao esforço axial nos tirantes e ao deslocamento vertical do tabuleiro. Por último, a caracterização da irregularidade longitudinal do pavimento foi efectuada através do recurso a um varrimento espacial por intermédio de um perfilómetro laser. Os perfis longitudinais de irregularidade foram medidos ao longo das vias exteriores na situação actual e na situação correspondente ao futuro alargamento da faixa de rodagem, em ambos os sentidos. A qualidade do pavimento foi avaliada através da classificação estabelecida pela comissão ISO/TC 108 e com base na, determinação do Índice Internacional de Irregularidade (IRI).

A modelação numérica do comportamento dinâmico da ponte Salgueiro Maia sob cargas de tráfego envolveu o desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional da ponte e de um modelo numérico do veículo que teve em conta as características dos camiões utilizados nos ensaios de carga estáticos e dinâmicos da ponte. Os perfis de irregularidade utilizados nas análises foram os obtidos experimentalmente por intermédio de um perfilómetro laser. A calibração experimental do

modelo numérico envolveu diversas comparações entre resultados numéricos e experimentais obtidos nos ensaios de carga estático, de vibração ambiental e dinâmico sob tráfego controlado. Em relação ao ensaio de carga estático, foram efectuadas comparações entre os resultados relativos ao deslocamento vertical e da rotação da secção de meio vão, bem como dos esforços axiais nos tirantes. Em termos de extensões na secção de meio vão, as comparações foram realizadas para um ensaio em que se efectuou uma passagem de 4 camiões circulando a 15 km/h, lado a lado. A calibração do modelo envolveu ainda uma comparação entre os parâmetros modais calculados e os parâmetros modais identificados por intermédio do ensaio de vibração ambiental realizado pelo LNEC. No que se refere ao ensaio dinâmico sob tráfego controlado, as comparações foram efectuadas em termos de factores de amplificação dinâmica relativos a extensões, a deslocamentos e ao esforço axial nos tirantes, bem como em termos de valores de pico da aceleração no tabuleiro.

Com base no modelo numérico do sistema ponte-veículos desenvolvido e calibrado experimentalmente, foi efectuada uma análise estocástica dos efeitos dinâmicos de cargas de tráfego rodoviário na ponte Salgueiro Maia. A abordagem teve em conta, além da interacção dinâmica entre a ponte e os veículos, a natureza aleatória de diversos factores com forte influência na resposta estrutural, tais como a irregularidade do pavimento, as características de rigidez e amortecimento do sistema de suspensão, as características de rigidez dos pneus e a distância entre veículos. Os cenários de simulação considerados corresponderam à passagem sobre a ponte de um comboio formado por 3 camiões, circulando às velocidades de 60, 90 e 120 km/h e considerando três níveis de qualidade do pavimento (médio, bom, e muito bom) referidos pela comissão ISO/TC 108. Os efeitos dinâmicos induzidos pelo tráfego foram analisados em termos dos factores de amplificação dinâmica e dos valores de pico da aceleração obtidos após a realização de 32 simulações, para as velocidades e níveis de qualidades do pavimento referidos.

## **Abstract**

The main aim of this thesis was the development of tools for the evaluation of dynamic effects of road traffic in bridges, using both experimental and numerical techniques. In what concerns the experimental component of the work, the dynamic effects were quantified by means of a strain measurement system based on electrical resistance strain gages. In relation to the numerical component, the dynamic effects were evaluated through a computational model, which takes into account the dynamic interaction between the bridge and vehicles and the characteristics of the pavement roughness.

The dynamic measurement system was applied to the study of the dynamic effects of road traffic in Salgueiro Maia Bridge. For this, a set of embedded strain gages was installed near the mid-span of the deck. The choice of the points of instrumentation was dictated by the interest of evaluating not only global dynamic effects on the deck but also local effects due to deformation of the lateral slabs. Moreover, load cells were still installed in several stay cables to measure the axial force in those

structural elements. The measurement system was applied in the reception tests of the bridge, which consisted of a static load test, an ambient vibration test and dynamic tests under controlled traffic. The static load tests were performed according to different load configurations. For that purpose, 20 articulated trucks were used with a gross weight of 38-40 t each. The experimental identification of the modal parameters of the bridge was made through a preliminary ambient vibration test, subsequently complemented by a complete test conducted by LNEC. The dynamic tests under controlled traffic were made with the main aim of experimentally evaluating dynamic amplification factors associated to the passage of heavy trucks. The trucks were of the same type used in the static load tests, circulating at different speeds and along several lanes, isolated or in groups. The level of importance of the dynamic effects induced by traffic loads was measured by the so-called Dynamic Amplification Factors (DAFs). The DAFs were evaluated in terms of strains, associated to global and local effects, of axial force in the stay cables and of vertical displacement of the deck. At last, the roadway roughness was measured with the help of a laser profilograph, which allowed to obtain the longitudinal profile for the slow lane of the actual situation and for the situation corresponding to the future enlargement of the carriageway, and in both senses of traffic. The quality of the pavement was evaluated using the classification established by ISO/TEC 108 commission and on the basis of the calculation of the International Roughness Index (IRI).

The numerical modelling of the dynamic behaviour of Salgueiro Maia bridge under road traffic loads involved the development of a three dimensional model of the bridge and of a numerical model of the vehicle, which took into account the characteristics of the heavy trucks really used in the static and dynamic tests performed. The longitudinal road profiles used in the analyses were the experimentally obtained with the help of a profilograph laser. The experimental calibration involved several comparisons between experimental and numerical results obtained in the static load test, ambient vibration test and dynamic tests under controlled traffic. In relation to the static load tests, the comparisons were done in terms of vertical displacement and rotation at the midspan cross section of the deck, as well as of axial forces in the stay cables. In terms of strain values in the midspan section of the deck, the comparisons were done considering the test where four trucks crossed the bridge circulating side by side at 15 km/h. The calibration of the model also involved the comparison between calculated and identified modal parameters obtained through the ambient vibration test performed by LNEC. In relation to the dynamic tests under controlled traffic, the comparison was made on the basis of dynamic amplification factors related with strains, vertical displacements of the deck and axial force in the stay cables, as well as of peak values of vertical acceleration on the deck.

Based on the numerical model of the bridge-vehicles system previously developed and experimentally calibrated, was a stochastic simulation of the dynamic response of Salgueiro Maia bridge under traffic loads performed. The approach took into account, beyond the dynamic interaction between the vehicles and the bridge, the random nature of different factors conditioning the structural response, such as the pavement roughness, the stiffness and damping of the suspension system, as well as the stiffness of the tires, and the distance between vehicles. The numerical simulations developed considered the passage of a convoy of three trucks, circulating at speeds of 60, 90 e 120 km/h, and assuming three different qualities of the roadway pavement (average, good and very good) referred by

ISO/TEC 108 commission. The dynamic effects induced by the road traffic were analysed in terms of dynamic amplification factors and peak values of the acceleration obtained after performing 32 simulations, for the speeds and levels of quality of the pavement referred.