

Utilização de ensaios dinâmicos na avaliação da segurança de estruturas: caso de estudo

Use of dynamic tests in the safety assessment of structures: case study

Roberto Laranja¹ | Ana Carreira¹ | João M. C. Estêvão¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, ISE, Universidade do Algarve, Portugal, rlaranja@ualg.pt; ascarrei@ualg.pt; jestevao@ualg.pt

resumo

A vibração induzida por máquinas rotativas é um problema que pode afetar o regular funcionamento de um sistema estrutural bem como o conforto dos utilizadores expostos, dado que o ser humano é sensível às vibrações, designadamente quando são ultrapassados determinados níveis de aceleração. Isso pode originar a sensação de desconforto e problemas de saúde, pelo que é da maior importância a medição desses níveis de vibração. Além disso, a vibração continuada poderá originar fenómenos de fadiga nos sistemas estruturais. Neste trabalho, é apresentado um caso de estudo onde é ilustrada a utilização de ensaios dinâmicos *in situ*, nomeadamente como forma de apoio à realização da avaliação da segurança última e em serviço de um edifício industrial em betão armado, que apresentava indícios de existirem anomalias estruturais, e onde os trabalhadores sentiam as vibrações induzidas pelas máquinas da fábrica.

Palavras-chave: Testes dinâmicos, Segurança, Vibração mecânica, Percepção humana

abstract

Vibration induced by rotating machines is a problem that can affect the regular functioning of a structural system as well as the comfort of exposed users, because humans are sensitive to vibrations, namely when certain acceleration levels are exceeded. This can lead to discomfort and health problems, so it is of utmost importance to measure these vibration levels. In addition, continued vibration may lead to fatigue phenomena in structural systems. In this work, a case study is presented where the use of *in situ* dynamic tests is illustrated, namely to support the assessment of the ultimate safety and serviceability of an industrial reinforced concrete building, which showed signs of structural anomalies and where workers felt the vibrations induced by the factory machines.

Keywords: Dynamic tests, Structural safety, Mechanical vibration, Human perception

1. INTRODUÇÃO

O presente caso de estudo incide sobre parte de um edifício industrial com dois pisos, apresentando estrutura em betão armado, cujo projeto é datado de 1982. Sobre a laje de piso estão assentes máquinas de impressão de circuitos eletrónicos, a ar comprimido, e fornos com motores rotativos, que, para além das cargas estáticas, também impõem vibração à laje (CEN 2006). Neste contexto, a problemática da exposição humana às vibrações deverá merecer especial atenção, pois além de serem particularmente desagradáveis para os trabalhadores, também podem gerar fenómenos de ressonância no corpo humano e conduzir a problemas de saúde, em situações de exposição prolongada por vários anos (Azevedo e Patrício, 2001).

Com vista à identificação da origem do problema, e correspondente solução, foi realizada uma campanha de medições *in situ* do nível de vibração, complementado por um estudo numérico, cujos resultados se apresentam em seguida.

2. CASO DE ESTUDO

2.1. Descrição da estrutura

O painel de laje analisado é um de três painéis do piso intermédio do edifício, que constituem um dos módulos da fábrica, e que estão separados por juntas de dilatação. Cada painel tem vãos de 8,65 m por 30,00 m (Fig. 1). Em todo o seu perímetro, e nos apoios intermédios, a laje assenta em paredes resistentes de betão armado com 0,15 m de espessura.

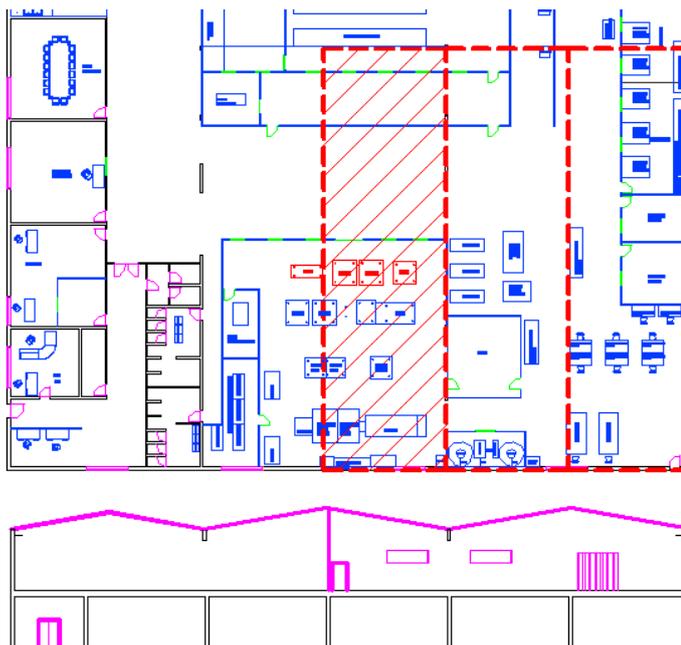


Fig. 1 | Planta parcial do piso e corte do armazém, com a localização da laje e do painel analisado

Trata-se de uma laje fungiforme, aligeirada, com uma espessura total de 0,45 m. As nervuras, com largura variável entre 0,15 m na face inferior e 0,30 m no topo, têm afastamento, entre eixos e em ambas as direções, de 0,80 m. A espessura da lajeta de compressão é de 0,05 m (Fig. 2). Junto aos apoios, nas paredes resistentes, existem bandas maciças, com 0,45 m de espessura, com larguras entre 0,30 m e 0,35 m.

2.2. Anomalias Existentes

Existem relatos de vibração da laje sentida por parte dos funcionários da empresa, que referem ser mais intensa e perceptível desde a instalação da quarta e última linha de equipamentos (Fig.3), representada a vermelho na Fig. 1.

Foi possível também observar a existência de alguma fissuração na superfície do pavimento, sobre a laje, nas zonas em que esta se apoia nas paredes estruturais do piso térreo (Fig. 4). Segundo os funcionários da empresa estas fissuras agravaram-se após a instalação da última linha de equipamentos. Não foi possível aceder e inspecionar a face inferior do painel da laje analisado.

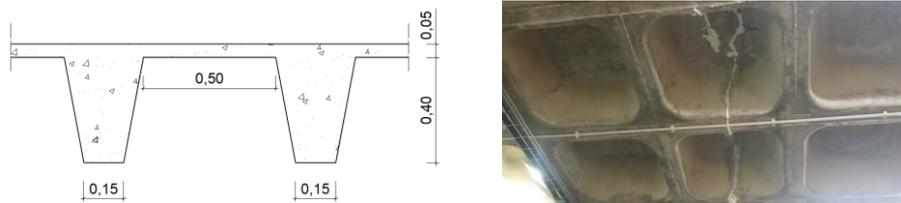


Fig. 2 | Laje existente: representação em corte e aspeto da face inferior

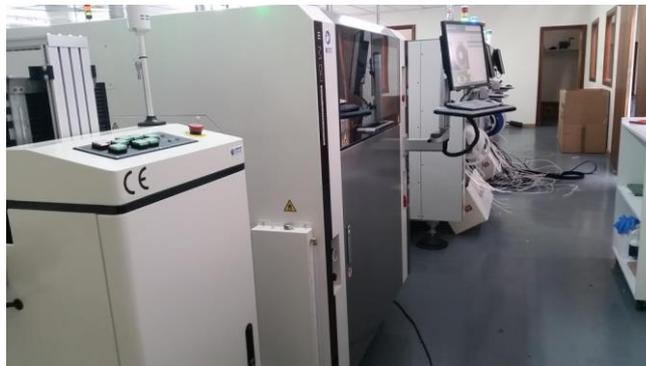


Fig. 3 | Aspeto da última linha (linha 4) de equipamentos instalada



Fig. 4 | Fissura na face superior da laje analisada

3. ENSAIOS DE VIBRAÇÃO

Foram realizados ensaios de vibração forçada na laje, com o objetivo de avaliar a segurança da estrutura e o conforto dos trabalhadores. As vibrações impostas pelo funcionamento dos equipamentos mecânicos assentes na laje foram registadas em vários pontos, com recurso a um acelerómetro Wilcoxon modelo 793LE e um analisador de dados tipo CSI modelo 2140Ex nº B2140130187. Os registos dos ensaios foram analisados, em termos de gama de frequências de interesse e níveis de vibração.

3.1. Descrição dos ensaios

A caracterização da vibração da laje foi realizada através do registo do nível global de velocidade e dos espectros de frequência nos 15 pontos identificados na Fig. 5. Na Fig. 6 exemplifica-se um dos registos obtidos.

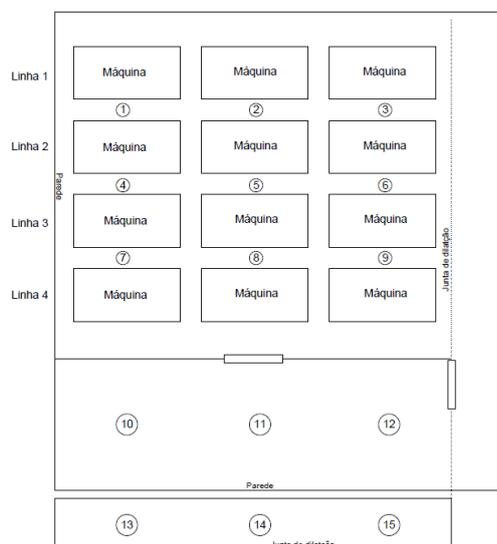


Fig. 5 | Fissura na face superior da laje analisada

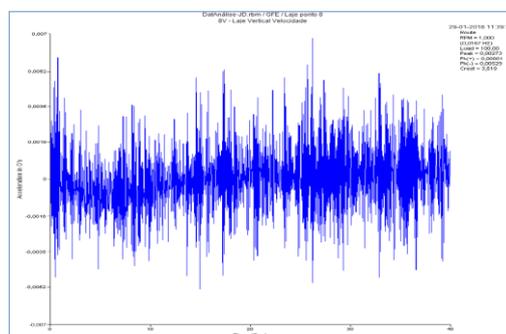


Fig. 6 | Fissura na face superior da laje analisada

As medições foram realizadas para quatro casos de funcionamento dos equipamentos mecânicos, instalados em linhas, os quais corresponderam a: i) registos nos 15 pontos com todas as máquinas a funcionar; ii) registos nos pontos 5 e 11 com as máquinas da linha 4 desligadas; iii)

registos nos pontos 5 e 11 com as máquinas da linha 2 desligadas e iv) registos nos pontos 5 e 11 com todas as máquinas desligadas.

3.2. Análise dos resultados

Pela análise dos resultados correspondentes às medições realizadas, constata-se que os espectros de velocidade evidenciam uma concentração da energia do sinal na gama de frequências, entre os 5 Hz e os 20 Hz, verificando-se, no entanto, em alguns registos que existe ainda alguma energia de vibração até à frequência de aproximadamente 40 Hz.

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados, em termos de velocidade global de vibração, para cada um dos casos de funcionamento dos equipamentos mecânicos. Pela análise da Tabela observa-se que:

- a maior intensidade de vibração surge a meio vão da laje, nos pontos de registo 5 e 11;
- a velocidade máxima de vibração com todos os equipamentos a funcionar toma o valor 0,463 mm/s, observando-se uma redução significativa da vibração da laje quando as máquinas de uma das linhas de impressão estão desligadas;
- na situação de funcionamento simultâneo das máquinas das linhas 1, 2 e 3 (linha 4 desligada) a velocidade global máxima de vibração é 0,180 mm/s, o que corresponde a cerca de 40% da vibração da laje quando estão todos os equipamentos a funcionar;
- No caso de funcionamento das máquinas das linhas 1, 3 e 4 (linha 2 desligada) a velocidade

Tabela 1 | Valores de velocidades globais de vibração da laje ($V_{RMS,global}$ em mm/s)

Ponto de registo	Todas as máquinas a funcionar	Máquinas da linha 4 desligadas	Máquinas da linha 2 desligadas	Todas as máquinas desligadas
1	0,242	---	---	---
2	0,435	---	---	---
3	0,186	---	---	---
4	0,223	---	---	---
5	0,463	0,156	0,139	0,053
6	0,231	---	---	---
7	0,161	---	---	---
8	0,382	---	---	---
9	0,237	---	---	---
10	0,385	---	---	---
11	0,408	0,180	0,144	0,047
12	0,264	---	---	---
13	0,236	---	---	---
14	0,355	---	---	---
15	0,229	---	---	---

máxima de vibração é 0,144 mm/s, o que corresponde a cerca de 30% da vibração da laje quando as máquinas estão todas a funcionar.

Dos registos de vibração realizados para os distintos casos de funcionamento dos equipamentos é possível referir que, com as máquinas da linha 2 desligadas, verifica-se uma redução significativa dos níveis de vibração impostos na laje.

A problemática da exposição humana às vibrações deverá merecer atenção, pois estas além de serem particularmente desagradáveis para os trabalhadores, podem gerar ressonâncias no corpo humano e conduzir a problemas de saúde, em situações de exposição prolongada por vários anos. Para a laje em estudo, e de acordo com os limites dos critérios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Azevedo e Patrício, 2001), a velocidade de vibração registada na situação das máquinas estarem todas em funcionamento ($V_{RMS,global} = 0,463$ mm/s) pode provocar incómodo nos trabalhadores, podendo mesmo afetar as suas condições de trabalho. Nas situações em que as máquinas de impressão de uma das linhas estão desligadas, mantendo-se a funcionar as máquinas das restantes três linhas ($V_{RMS,global} = 0,180$ mm/s) e ($V_{RMS,global} = 0,144$ m/s), de acordo com referidos os critérios LNEC, a vibração apesar de perceptível para os trabalhadores é suportável para pequenas durações.

Desta análise poderá referir-se que, em termos de exposição dos trabalhadores e de efeitos na estrutura, a situação em que as máquinas da linha 2 estão desligadas, funcionando simultaneamente apenas as máquinas das linhas 1, 3 e 4 é a mais favorável. Com esta combinação os níveis de vibração são cerca de 70% inferiores aos níveis que se registaram com as máquinas todas a funcionar.

4. ANÁLISE ESTRUTURAL DA LAJE

Também foi realizada a análise estática e dinâmica da estrutura, com recurso ao programa SAP2000 (CSI 2015), usando as características dos materiais previstas no projeto original, que foram o betão da classe B180 e aço da classe A40T, de acordo com a regulamentação em vigor naquela data. A deformada obtida no contexto da análise estática realizada, representada sobre a malha de elementos finitos que foi adotada no presente estudo, está apresentada na Fig. 7.

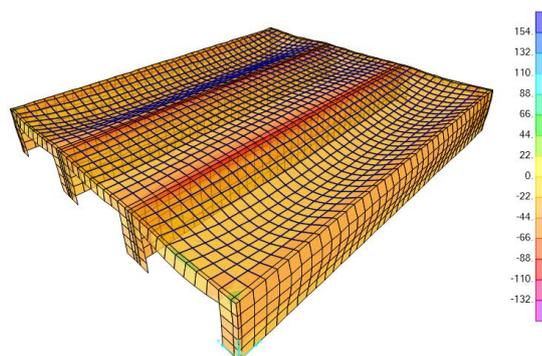


Fig. 7 | Deformada da estrutura obtida da análise estática

No contexto da análise modal realizada, foram obtidos 20 modos de vibração, que se julgaram suficientes para a avaliação da segurança da laje, designadamente por cobrirem as frequências de interesse da laje, atendendo aos resultados obtidos nos ensaios.

Em seguida, foi realizada uma análise dinâmica linear temporal, usando um acelerograma gerado de forma estocástica, cujo espectro de resposta é aproximadamente constante a partir de 1 Hz. Esta aceleração foi ajustada tendo em atenção as máximas acelerações obtidas nas lajes durante os ensaios realizados. A aceleração foi introduzida de duas formas:

- considerando uma aceleração vertical a afetar a laje de forma geral;
- de forma a gerar forças de inércia pontuais nos apoios das máquinas de impressão.

Os resultados evidenciam deformadas que se ajustam aos pontos onde a vibração é mais perceptível pelos utentes (Fig. 8). Contudo, os esforços obtidos com este nível de vibração são relativamente pequenos e não parecem ser, por si só, a origem das fendas surgidas na camada de enchimento da laje, e não parecem comprometer a segurança última da estrutura. No entanto, estas vibrações em conjunto com elevadas sobrecargas existentes na laje, irão originar o agravamento do estado de tensão na laje, podendo induzir fenómenos de fadiga material a médio/longo prazo.

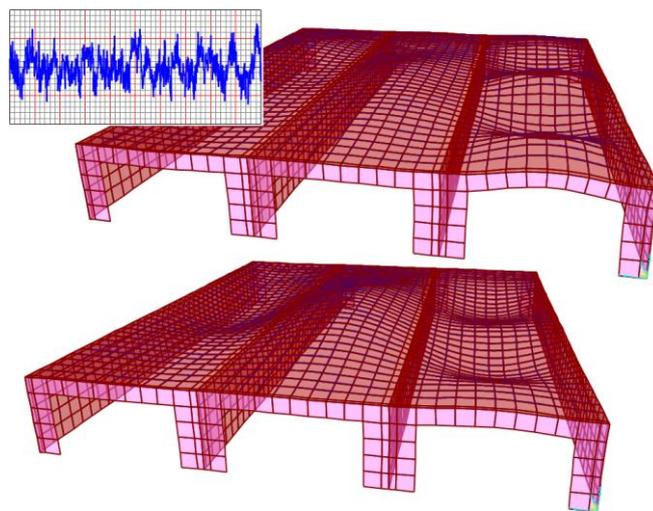


Fig. 8 | Configurações deformadas da laje quando sujeita a um conjunto de forças de inércia nos apoios dos equipamentos mecânicos, em dois instantes diferentes, que ilustram os efeitos sentidos pelos utentes da laje

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No âmbito deste estudo realizou-se uma campanha de medições que consistiu no registo dos níveis de vibração em vários pontos da laje, gerados por diferentes combinações de funcionamento dos equipamentos assentes na mesma: funcionamento simultâneo das máquinas das quatro linhas e funcionamento simultâneo das máquinas de apenas três linhas.

Pela análise dos registos dos níveis de vibração obtidos e sua comparação com os critérios estabelecidos pelo LNEC, em termos de exposição dos trabalhadores, é possível tecer as seguintes considerações:

- é provável que o funcionamento simultâneo de todas as máquinas de impressão instaladas na laje provoque incómodo nos trabalhadores, podendo mesmo afetar as suas condições de trabalho;
- com as máquinas de impressão de uma das linhas desligadas, mantendo-se a funcionar as máquinas das restantes três linhas, verifica-se uma redução significativa dos níveis de vibração impostos na laje face à situação anterior. Das combinações ensaiadas, a mais favorável em termos de conforto humano corresponde ao funcionamento simultâneo das máquinas das linhas 1, 3 e 4, mantendo desligadas as máquinas da linha 2. Nesta situação, é provável que a vibração gerada seja perceptível para os trabalhadores expostos, mas suportável para durações não muito longas.

Da análise dinâmica realizada com o nível de aceleração registado *in situ*, é possível concluir que as vibrações induzidas pelas máquinas não provocam um acréscimo significativo de esforços na laje.

Contudo, a combinação desta ação dinâmica com as ações estáticas (correspondentes aos pesos das máquinas e demais sobrecargas), pode explicar os danos observados na face superior da laje, junto aos apoios, em virtude dos momentos fletores negativos serem muito elevados para a reduzida dimensão da zona maciça de laje nos apoios, e dimensões das nervuras.

Nesta situação, vibrações provocadas pelos equipamentos em conjunto com elevadas sobrecargas na laje, irão originar o agravamento do estado de tensão na laje, podendo induzir fenómenos de fadiga material a médio/longo prazo. A redução das vibrações, com a anulação do funcionamento dos equipamentos da linha 2, por exemplo, contribuirá para reduzir este risco.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que os níveis de vibração mecânica não eram suficientes para originar os danos estruturais observados, embora fossem um motivo do seu agravamento. Contudo, em relação ao desconforto reportado pelos trabalhadores da fábrica, os resultados indicaram que o funcionamento em simultâneo de todas as linhas de produção poderia afetar as suas condições de segurança e saúde no trabalho, designadamente a médio/longo prazo. O estudo permitiu identificar qual dessas linhas é que mais contribuía para o agravamento das condições de trabalho, de modo a minimizar o risco dos trabalhadores e o impacto na produção da fábrica, e ilustra a importância da realização dos ensaios *in situ* na identificação dos problemas.

REFERÊNCIAS

- CEN 2006, EN 1991-3:2006. Eurocode 1 - Actions on structures - Part 3: Actions induced by cranes and machinery.
- Computers & Structures, I. 2015. SAP 2000 – Structural Software for Analysis and Design. V18. Berkeley.
- Schiappa de Azevedo, F., and Patrício, J., 2001, Vibrações Ambientais. Critérios de Danos e de Incomodidade. Actualidade e Perspectivas Futuras, XXXII Congreso Nacional de Acústica, Tecnicacústica 2001, pp. 1–9. Rioja, Espanha.