

## CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DAS BANCADAS PRINCIPAIS DO ESTÁDIO ALGARVE



Carlos A. P. MARTINS  
Professor Adjunto  
EST-UALG  
Faro



João M. C. ESTÊVÃO  
Professor Adjunto  
EST-UALG  
Faro

### SUMÁRIO

No presente artigo apresenta-se o estudo de revisão do Projecto de Estabilidade e Fundações das Bancadas Nascente e Poente do Estádio Algarve. Dá-se relevo ao comportamento dinâmico da estrutura da Bancada Poente, com a descrição das respostas da mesma perante a acção sísmica e a acção das multidões.

### 1. INTRODUÇÃO

O Estádio Algarve é um dos estádios cuja construção foi motivada pela realização, em Portugal, do Campeonato Europeu de Futebol EURO 2004. A gestão da construção coube à Sociedade de Concepção, Execução e Gestão do Parque das Cidades de Loulé/Faro.

A inexistência, no projecto, dos resultados duma análise dinâmica, motivou a realização dum estudo, visando a revisão do Projecto de Estabilidade e Fundações, do qual emanaram sugestões de alteração ao projecto inicial. Com condição básica, essas sugestões não poderiam incorrer em mudanças, nem nas soluções estruturais, nem nas dimensões aparentes dos elementos estruturais, dada a ligação desses elementos (metálicos e de betão armado) na imagem arquitectónica do estádio.

A Área Departamental de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia (EST) da Universidade do Algarve (UALG), realizou a análise das bancadas principais (Nascente e Poente), sem o efeito da cobertura, nos mesmos termos que o projecto inicial.

Este artigo incide sobre a Caracterização Dinâmica da Bancada Poente que, sendo muito semelhante à Bancada Nascente, apresenta pior desempenho dinâmico.

A elevada flexibilidade da estrutura da Bancada Poente do estádio, apresentando grandes balanços nas consolas e grandes vãos nas vigas, por comparação com arquitecturas com alguma semelhança [1], exigiu que a análise dinâmica possibilitasse a verificação da segurança tendo em conta as vibrações induzidas pelos sismos e pelas pessoas. Em relação à acção do vento, o estudo dinâmico da interacção da cobertura e da bancada requer o recurso a estudos experimentais, em modelo reduzido, em túnel de vento.



Figura 1: Bancada principal do Estádio Algarve

## 2. MODELO ESTRUTURAL

Foi adoptado um modelo computacional tridimensional de elementos finitos de toda a bancada. A estrutura reticulada metálica e de betão armado foi modelada por elementos de barra com deformabilidade axial, por flexão e corte. As estruturas laminares (lajes, muros e paredes) foram modeladas com recurso a elementos isoparamétricos de quatro nós, de forma a adaptarem-se à geometria da construção, com o cuidado de minimizar os erros numéricos inerentes a malhas de elementos muito irregulares. Para as lajes não foi considerada a deformabilidade no plano.



Figura 2: Estrutura das Bancadas (fases de construção)

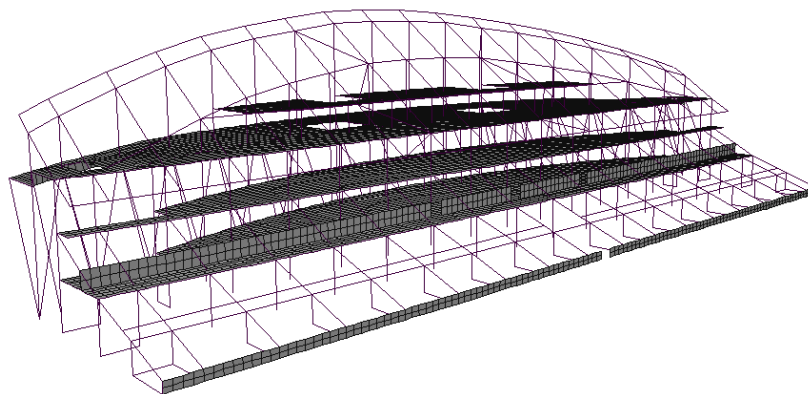


Figura 3: Modelo estrutural adoptado para a Bancada Poente

### 3. ANÁLISE MODAL

A determinação das frequências naturais dos modos de vibração, e respectivas configurações, foi realizada por meios computacionais, em que o problema correspondente de valores e vectores próprios foi solucionado por iteração matricial inversa [2].

Foi adoptada uma discretização que permitisse a determinação de todos os modos de vibração importantes para a análise da estrutura, nomeadamente modos locais passíveis de entrar em ressonância face às vibrações induzidas pelas pessoas [3]. A massa correspondeu ao valor associado às acções quase permanentes, como é estipulado na regulamentação nacional, também para recintos desportivos [4].

A existência de um grande número de modos de vibração, no modelo adoptado, tornou impossível, do ponto de vista computacional, a quantificação de todos eles. Face a essas limitações, foram calculados 150 modos de vibração, número necessário para a mobilização de, aproximadamente, 90% da massa total (em três direcções ortogonais), como é estipulado no Eurocódigo 8 [5]. Em virtude das frequências e dos resultados dos últimos modos calculados, foi assumido que nenhum modo em falta apresentaria mais do que 5% da massa total.

Os resultados referentes aos modos mais importantes estão apresentados no quadro seguinte.

Quadro 1: Frequências próprias e massas modais efectivas dos principais modos de vibração

Modos	f (Hz)	Valores modais (%)			Valores acumulados (%)		
		x	y	z	x	y	z
1	1.06	27.47	0	0	27.47	0	0
2	1.73	33.55	0	0	61.01	0	0
3	2.67	0	58.07	1.40	61.01	58.07	1.40
5	3.52	1.37	0	0	62.38	58.07	1.40
7	3.83	0	2.81	0.27	62.38	61.08	1.70
8	3.88	0	2.64	2.64	62.38	63.71	4.33
12	4.08	1.74	0	0	64.19	64.45	4.89
16	4.34	0	0.75	1.40	64.42	65.52	6.52
20	4.81	0	1.38	0.50	64.43	66.90	7.03
26	5.13	6.97	0	0	71.84	66.94	7.37
27	5.14	0	1.90	0.94	71.84	68.84	8.34
44	6.32	4.64	0	0	77.84	69.54	9.24
49	6.78	1.68	0	0	80.38	69.98	9.70
55	7.56	0	3.32	0	80.38	73.37	10.23
57	7.59	0	1.17	4.14	80.38	74.55	14.41
60	7.62	0	0.52	2.41	80.50	75.08	16.97
62	7.68	0	2.34	1.97	80.50	77.73	18.99
66	7.82	1.26	0	0	81.86	78.02	19.02
89	8.48	0	1.19	1.50	82.18	80.77	30.43
94	8.68	0	2.44	0.36	82.48	83.40	31.55
96	8.71	0	6.26	1.11	82.50	89.67	32.66
99	8.77	0	1.44	1.40	82.51	91.11	34.06

## 4. ACCÇÕES DINÂMICAS

### 4.1. Acção resultante da movimentação das pessoas

Presentemente, os eventos que se realizam nos estádios não são unicamente de natureza desportiva, mas também de cariz musical. A ocorrência de concertos de música "Pop" ou "Rock", que induzam uma massa humana a actuar ritmadamente, podem levar a movimentos vibratórios ressonantes, verticais e horizontais, inaceitáveis do ponto de vista da segurança [6,7] e conforto.

O movimento ritmado das pessoas pode ser traduzido por uma soma de harmónicas de várias frequências ( $f_1, f_2, f_3, \dots$ ). As frequências das harmónicas de valor mais elevado correspondem à multiplicação do número de ordem do modo de vibração pelo valor da frequência fundamental ( $f_2=2 \cdot f_1, f_3=3 \cdot f_1, \dots$ ).

A importância das diversas harmónicas é dependente da forma como as pessoas se movimentam e é condicionada pela natureza do evento:

- Eventos em que o espectador se limita a observar, sem música ou canções – 1ª harmónica;
- Eventos com canções sem acompanhamento musical – já com alguma influência da 2ª harmónica;
- Eventos com a audiência a participar (sem acções de impacto), resultante da existência de canções com acompanhamento musical – 1ª e 2ª harmónicas;
- Concertos "Pop" ou "Rock", com a audiência aos saltos (acções de impacto), actuando de forma ritmada – 1ª e 2ª harmónicas importantes, ganhando também importância a 3ª harmónica quando as pessoas actuam de forma muito sincronizada.

A existência de harmónicas, resultantes da movimentação das pessoas, com frequências ressonantes ou próximas das frequências naturais de vibração, podem levar ao pânico. A resposta da estrutura será limitada pelo valor do amortecimento e pela perda de sincronismo da acção, resultante do pânico desordenado.

A caracterização da resposta dinâmica para pequenas vibrações, num modelo numérico, é imprecisa, quer pela dificuldade na quantificação da rigidez real da estrutura, quer pela forma simplificada como é definida a matriz de amortecimento, baseada, normalmente, no conceito de coeficiente de amortecimento modal. Estes motivos levam a que a verificação da segurança seja realizada com base em valores mínimos de referência das frequências naturais de vibração calculadas [7] ou com base em testes dinâmicos *in situ* [8,9].

O Eurocódigo 3 [10] refere que, para estruturas metálicas, as frequências mínimas (modos verticais e com massa correspondente ao valor frequente de acções) devem ser de 3 Hz para zonas de passagem de pessoas e de 5 Hz em zonas sujeitas a acções ritmadas.

Estudos recentes [6] referem, para estádios vazios, um mínimo de 6 Hz (todo o tipo de eventos), para frequências naturais correspondentes a modos de vibração na direcção vertical e 3 Hz na direcção horizontal. Para recintos destinados, unicamente, a eventos desportivos são aceitáveis frequências mínimas (modos verticais) de 3.5 Hz. Situações que apresentem frequências de cálculo entre 3 Hz e 3.5 Hz (modos verticais), devem ser acompanhadas de medidas reguladoras da actividade das pessoas, no recinto, e de testes *in situ*.

Um valor de aceleração de 0.04g é apontado como limite superior recomendado, por forma a prevenir a ocorrência de pânico generalizado, resultante das vibrações induzidas pela acção sincronizada das pessoas que assistem aos eventos musicais [6].

Neste contexto, foi realizada uma campanha de medições das vibrações, resultantes do ruído ambiente, com as bancadas vazias, o que permitiu determinar as frequências naturais de vibração. Esses valores foram quantificados com base nos picos das funções de densidade espectral de potência de aceleração.

O pico de maior valor, associado a vibrações na direcção vertical da zona em consola das bancadas da estrutura metálica, correspondeu ao valor aproximado de 7.4 Hz, existindo outros modos de vibração, de menor importância, com frequências inferiores.

#### **4.2. Acção sísmica**

O projecto inicial da estrutura das bancadas teve por base uma análise sísmica, realizada pela equipa projectista, de forma simplificada, equiparando a acção sísmica a um conjunto de forças estáticas actuando, separadamente, segundo a direcção transversal e longitudinal da estrutura, de acordo com o R.S.A.E.P. [4]. Esse procedimento, baseado no pressuposto de que a resposta máxima é resultado, essencialmente, da contribuição do 1º modo de vibração (para cada uma das direcções), tem uma validade muito questionável neste tipo de estrutura, dada a sua grande irregularidade em alçado. A não consideração da componente vertical não possibilitou a verificação da segurança, localmente, das consolas com grandes balanços.

O estudo sísmico, realizado no âmbito do estudo solicitado, teve como suporte uma análise modal com recurso aos espectros de resposta para os sismos tipo 1 e 2 do R.S.A.E.P., tendo sido consideradas três componentes ortogonais dos sismos, duas horizontais e uma vertical.

A resposta máxima da estrutura, devida a cada uma das componentes, foi obtida por combinação quadrática completa das respostas máximas de cada um dos modos de vibração. O valor máximo em resultado de todas as componentes do sismo, foi obtido por combinação quadrática simples dos resultados das diversas componentes.

### **5. RESULTADOS E CONCLUSÕES**

O estudo geral do comportamento dinâmico das bancadas principais referidas, evidenciou uma concepção estrutural pouco apropriada, que se traduziu num aumento da vulnerabilidade da estrutura, quer para a acção de massas humanas em movimento, quer face à possível ocorrência de um sismo, dada a elevada casualidade sísmica da região onde o Estádio Algarve está implantado.

O estudo realizado teve como consequência importante a elaboração dum conjunto de recomendações, não envolvendo mudanças às dimensões dos elementos estruturais (que em alguns casos seriam desejáveis), que foram acatadas por todos os intervenientes na construção.

Em face da análise sísmica realizada, foram também sugeridas alterações às pormenorizações das secções de betão armado. Foi dada especial atenção à pormenorização das regiões críticas dos pilares, por forma a garantir a existência de uma estrutura globalmente dissipativa.

A existência de secções tubulares metálicas em elementos da maior importância para a segurança da estrutura, classificadas, de acordo com o Eurocódigo 3, de classe 4, suscitaram grande apreensão quanto ao comportamento dissipativo do conjunto, violando inclusive as recomendações do Eurocódigo 8. Nesse contexto, foi apontada como solução o aumento da espessura dessas secções tubulares, o que se traduziu, também, num aumento ligeiro da rigidez global da estrutura.

Se a vulnerabilidade sísmica da estrutura foi reduzida, em face das alterações propostas, apesar de algumas dimensões de secções de pilares e vigas não serem as mais desejáveis, o comportamento dinâmico das bancadas aquando da realização de eventos com música, poderá causar alguma apreensão, pelo que a monitorização da estrutura deve ser acautelada.

Os resultados da campanha de medições realizada (estádio vazio) salientam esse facto, pois foram determinados alguns picos correspondentes a frequências próprias inferiores ao limite desejável de 6 Hz, para modos de vibração com componente vertical.

É de salientar que esse comportamento poderá ser agravado tendo em conta a acção dinâmica conjunta do vento e das pessoas, dado que, por exemplo, o 3º e o 8º modos de vibração, de frequências baixas, envolvem deslocamentos verticais e horizontais.

Uma forma de minimizar o problema será, eventualmente, a colocação de amortecedores ligando a bancada e os núcleos de betão armado dos acessos interiores (actualmente separados por juntas).

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Administração da Sociedade de Concepção, Execução do Parque das Cidades de Loulé/Faro, pela confiança depositada no trabalho da Área Departamental de Engenharia Civil da EST da UALG, assim como a todos os docentes que contribuíram para este trabalho, nomeadamente o Eng. Cláudio Semião e o Eng. Carlos Silva.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] McDonald, D. - "Stadium Australia - The year 2000 Olympic Stadium", *Journal of the Australian Steel Institute*, 1999, Vol. 33, Nº 4, Australian Steel Institute, p. 4 - 13.
- [2] Clough, R. W.; Penzien, J. - *Dynamics of Structures*. 2<sup>ed</sup>. McGraw-Hill International Editions, 1993, 648 p.
- [3] Yao, S. *et al.* - "Forces generated when bouncing or jumping on a flexible structure", *Proceedings of ISMA 2002*, Vol.II, p. 563 - 572.
- [4] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Dec.-Lei nº35/83, de 31 de Maio. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1983.
- [5] Comité Européen de Normalisation - CEN - Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures. ENV 1998-1-1, 1994.

- [6] Pavic, A. *et al.* - "Verification of the existence of human-induced horizontal forces due to vertical jumping", 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, USA, Feb. 2002, p. 120 - 126.
- [7] Dougill, J. *et al.* - Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands Subject to Crowd Action - Interim Guidance on Assessment and Design. The Institution of Structural Engineers, London 2001, 22 p.
- [8] Reynolds, P.; Pavic, A. - "Modal testing of sports stadium", 20<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, USA, Feb. 2002, p. 1037 - 1043.
- [9] Dougill, J. *et al.* - *Dynamic Testing of Grandstands and Seating Decks - Advisory Note*. The Institution of Structural Engineers, London, 2002, 14 p.
- [10] Comité Européen de Normalisation - CEN - *Eurocode 3: Design of steel structures*. ENV 1993-1-1, 1992.