



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS DEGRAUS DE BANCADA DO ESTÁDIO DO DRAGÃO

JORGE ANÍBAL DE ANDRADE LEITE

julho de 2016

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO
DINÂMICO DOS DEGRAUS DE BANCADA DO ESTÁDIO DO DRAGÃO**

JORGE ANÍBAL DE ANDRADE LEITE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Co-Orientador: Engenheiro Hugo Alberto da Costa Marques (GEG)

JUNHO DE 2016

À minha esposa

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	v
Resumo.....	vii
Palavras-chave.....	viii
Abstract	ix
Keywords.....	x
Agradecimentos	xi
Índice de Texto	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Quadros	xxv
1 Introdução.....	1
2 Avaliação experimental das propriedades dinâmicas de estruturas	21
3 Metodologias de calibração experimental de modelos numéricos de elementos finitos.....	39
4 Caracterização experimental do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão	71
5 Modelação numérica e calibração experimental dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão	115
6 Conclusões e desenvolvimentos futuros	153
Referências Bibliográficas	161
Anexo I – Artigo publicado no Congresso ECCOMAS 2016	171
Anexo II – Artigo submetido e aceite no Congresso TEST&E 2016	189
Anexo III – Interface - Robot –Excel (Robot API).....	199

Anexo IV – Algoritmo genético..... 203

RESUMO

A presente dissertação visa a avaliação experimental e numérica do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do estádio do Dragão, envolvendo a sua modelação numérica, a caracterização experimental das suas propriedades dinâmicas e a calibração baseada em algoritmos genéticos.

Neste âmbito foram descritos os ensaios dinâmicos que usualmente são utilizados na caracterização dinâmica de estruturas, assim como as técnicas mais usuais de identificação modal. Foram também descritas as metodologias iterativas utilizadas na calibração de modelos de elementos finitos, tendo sido abordados os principais aspetos relacionados com análise de sensibilidade, as técnicas de emparelhamento de modos de vibração e a otimização com recurso a algoritmos genéticos. É ainda descrita uma metodologia de implementação computacional inovadora desenvolvida na articulação entre os programas comerciais ROBOT, EXCEL e MATLAB.

O caso de estudo teve como foco um conjunto de degraus de bancada com um vão aproximado de 8 m, localizados na bancada inferior sul do estádio do Dragão. Para o efeito foi desenvolvido um modelo numérico constituído por 10 degraus de bancada o qual inclui os apoios dos degraus nas vigas de suporte das bancadas.

Foi realizada a caracterização experimental do comportamento dinâmico das bancadas inferior norte e sul do estádio do Dragão, com base em duas campanhas de ensaios dinâmicos e que permitiram a caracterização das propriedades dinâmicas em termos de frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento. Foi ainda realizada uma inspeção visual aos degraus de bancada e realizado um ensaio de caracterização de betão com recurso a ultra-sons.

A calibração numérica do modelo de elementos finitos foi realizada com base numa metodologia iterativa assente em algoritmos genéticos, e utilizando uma ferramenta computacional inovadora que compreende a articulação entre os programas comerciais ROBOT e MATLAB por aplicação de uma rotina API numa folha de cálculo EXCEL. O processo de calibração envolveu a resolução de um problema de otimização que consistiu na minimização de uma função objetivo que inclui os resíduos

dos parâmetros modais numéricos e experimentais. A correspondência entre os modos de vibração foi realizada com recurso ao parâmetro MAC.

Os resultados da calibração dos degraus de bancada do estádio do Dragão demonstraram uma muito boa aproximação entre os parâmetros modais numéricos e experimentais e uma significativa melhoria do modelo numérico antes da calibração. Por outro lado a estabilidade de um significativo número de parâmetros, considerando diferentes populações iniciais, provou a robustez do algoritmo genético no âmbito da otimização de modelos numéricos.

PALAVRAS-CHAVE

Estádio do Dragão, bancadas, degraus de bancada, modelação numérica, ensaios dinâmicos, calibração experimental, algoritmos genéticos

ABSTRACT

This thesis focuses on the experimental and numerical evaluation of the dynamic behavior of seating deck units of Dragão Stadium involving their numerical modeling, experimental characterization of its dynamic properties and calibration based on genetic algorithms.

In this context dynamic tests have been described which are commonly used in dynamic characterization of structures, as well as the more usual techniques of modal identification. They have also been described iterative calibration methodologies used in finite element models having been covered the main aspects relating to sensitivity analysis of the vibration modes annealing techniques and optimization using a genetic algorithm. It is also described an innovative computational implementation methodology developed in coordination between software ROBOT, EXCEL and MATLAB.

The case study focused on the seating deck units with a bench will approximate 8 m, located in the south stand of Dragão Stadium. For this purpose was developed a numerical model comprises 10 seating deck units which includes the support on the the raker beams of the stand.

Experimental characterization of the dynamic behavior of the north and south stand of Dragão Stadium was carried out based on two dynamic test campaigns and allowed the characterization of dynamic properties in terms of natural frequencies, mode shapes and damping coefficients. It was further carried out a visual inspection of the seating deck units and carried out concrete characterization assay using the ultrasonic technic.

The numerical calibration of the finite element model was based on iterative methodology based on genetic algorithms, and using an innovative software tool that understands the link between the software ROBOT and MATLAB by applying an API routine in EXCEL sheet. The calibration process involved solving an optimization problem that was the minimization of an objective function that includes residues of numerical and experimental modal parameters. The correspondence between the vibration modes was performed using the MAC parameter.

The results of the calibration of the seating deck units of Dragão Stadium demonstrated a very good approximation between the numerical and experimental modal parameters and a significant improvement of the numerical model before calibration. Furthermore the stability of a significant number of parameters, considering different initial populations proved the robustness of the genetic algorithm in the context of optimization of numerical models.

KEYWORDS

Dragon Stadium, stands, seating deck units, numerical modelation, dynamic tests, experimental calibration, genetic algorithm.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é o culminar de um projeto que teve início à três anos, o qual permitiu o enriquecimento da minha formação académica. A força e a vontade aleadas à determinação foram os grandes pilares que estiveram na base da concretização deste projeto. Por tudo isso, quero aqui deixar o meu mais profundo e sincero agradecimento a todas as pessoas e entidades que de alguma forma contribuíram para a sua concretização, nomeadamente:

- Ao meu Orientador, Professor Doutor Diogo Ribeiro, agradeço-lhe todos os ensinamentos e a forma como eles foram transmitidos, a disponibilidade, a paciência e a motivação demonstradas ao longo deste percurso. Quero também expressar o meu agradecimento pelo espírito de entajuda demonstrado durante a realização deste trabalho;
- Ao meu Co-Orientador, Engenheiro Hugo Marques, pela disponibilidade demonstrada na prestação de informação do projeto e construção, e pela disponibilização de peças desenhadas do projeto de estruturas do estádio do Dragão. Quero também agradecer-lhe pela forma como se mostrou sempre disponível em auxiliar-me em todos os momentos que lho solicitei;
- Ao Professor Paulo Guedes, responsável pelo LEST – Laboratório de Estruturas do ISEP, pela disponibilização do material e equipamento necessários à realização dos ensaios dinâmicos;
- Ao Professor Doutor Rui Calçada, da FEUP, pelo apoio logístico e material necessário para a execução dos ensaios dinâmicos com o estádio do Dragão, fundamentais para a concretização deste trabalho;
- À Porto Estádio, em particular ao Engenheiro Ricardo Carvalho, pelas facilidades concedidas no acesso ao estádio do Dragão para realização dos ensaios nos degraus de bancada;
- Aos meus colegas, Vinicius Nicchio e Marcelo Magalhães, pela ajuda prestada na programação das rotinas API de otimização e pela ajuda na realização dos ensaios dinâmicos;

- Ao meu colega Bruno Oliveira pela ajuda prestada na realização dos ensaios dinâmicos;
- Ao meu colega André Santos pela ajuda prestada no desenvolvimento de ferramentas essenciais à interpretação de resultados;
- Aos Professores Pinto de Faria e Ricardo Santos pela ajuda prestada, pela camaradagem e boa disposição demonstradas na realização dos ensaios dinâmicos;
- Aos meus colegas e Professores do ISEP que me auxiliaram neste percurso, pela amizade, camaradagem e partilha de aspirações e expectativas;
- Ao meu amigo e engenheiro Nuno Melo, pela motivação dada no arranque desta aventura, sem o qual não teria sido realizada;
- Aos meus pais, Manuel e Tomásia, pelo carinho e apoio que sempre me demonstraram ao longo da minha vida, aos quais exprimo o meu mais profundo e sentido reconhecimento. Agradeço-lhes por me terem proporcionado todas as condições para me tornar em tudo o que sou hoje;
- À minha esposa e amiga, Isaura, à qual lhe agradeço a paciência, a compreensão, o apoio e o incentivo demonstrados antes e durante a realização deste trabalho. Um muito obrigado.

ÍNDICE DE TEXTO

Índice Geral	v
Resumo.....	vii
Palavras-chave.....	viii
Abstract	ix
Keywords.....	x
Agradecimentos	xi
Índice de Texto	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Quadros	xxv
1 Introdução.....	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Investigações anteriores.....	4
1.3 Investigações anteriores realizadas em portugal	9
1.4 Motivação, objetivos e organização da dissertação.....	16
2 Avaliação experimental das propriedades dinâmicas de estruturas.....	21
2.1 Introdução	21
2.2 Aspetos gerais.....	22
2.2.1 Sistemas de um grau de liberdade	22
2.2.2 Sistemas de múltiplos graus de liberdade.....	24
2.3 Ensaios <i>in situ</i> de caracterização dinâmica de estruturas	28
2.3.1 Ensaios de vibração forçada	28

2.3.2	Ensaio em vibração livre	30
2.3.3	Ensaio de medição de respostas às ações ambiente	31
2.4	Identificação modal estocástica no domínio da frequência	33
2.4.1	Método melhorado da decomposição no domínio da frequência - EFDD	35
2.4.1.1	Identificação das frequências naturais e dos modos de vibração.....	36
2.4.1.2	Identificação dos coeficientes de amortecimento	37
3	Metodologias de calibração experimental de modelos numéricos de elementos finitos.....	39
3.1	Introdução.....	39
3.2	Análise de sensibilidade	42
3.3	Técnicas de emparelhamento de modos de vibração	44
3.3.1	Critério de garantia modal - MAC.....	45
3.4	Otimização	47
3.4.1	Função objetivo	47
3.4.2	Algoritmos de otimização	49
3.4.3	Algoritmos genéticos	49
3.4.3.1	População inicial.....	52
3.4.3.2	Avaliação.....	52
3.4.3.3	Seleção.....	57
3.4.3.4	Reprodução (ou cruzamento).....	59
3.4.3.5	Mutação.....	61
3.4.3.6	Substituição	63
3.4.3.7	Restrições	64
3.4.3.8	Critérios de paragem	64
3.4.3.9	Estratégias de otimização.....	65
3.5	Implementação computacional do método iterativo.....	66
3.5.1	Descrição da metodologia iterativa.....	67

3.5.2	Interface – ROBOT – EXCEL (Robot API)	68
4	Caracterização experimental do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão	71
4.1	Introdução	71
4.2	O Estádio do Dragão	71
4.2.1	Descrição geral	71
4.2.2	Os degraus de bancada	74
4.2.3	Inspeção visual	78
4.3	Ensaio dinâmico	80
4.3.1	Planeamento dos ensaios	81
4.3.2	Fase 1	83
4.3.2.1	Descrição	83
4.3.2.2	Identificação dos parâmetros modais	89
4.3.3	Fase 2	96
4.3.3.1	Descrição	96
4.3.3.2	Identificação dos parâmetros modais	99
4.4	Ensaio de caracterização do betão com recurso a ultra-sons	105
4.4.1	Descrição	105
4.4.2	Aplicação	108
4.4.3	Resultados	110
5	Modelação numérica e calibração experimental dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão	115
5.1	Introdução	115
5.2	Modelo de elementos finitos dos degraus de bancada da bancada do estádio do dragão	115
5.2.1	Modelo numérico	116
5.2.2	Propriedades geométricas e mecânicas	118

5.2.3	Parâmetros modais.....	122
5.2.3.1	Frequências e modos de vibração.....	122
5.2.3.2	Análise de correlação	125
5.3	Calibração do modelo numérico dos degraus de bancada.....	127
5.3.1	Informação experimental	127
5.3.2	Análise paramétrica.....	128
5.3.2.1	Influência do número de degraus	128
5.3.3	Análise de sensibilidade.....	128
5.3.4	Otimização	134
5.3.5	Análise comparativa dos parâmetros modais antes e após a calibração.....	142
5.3.6	Análise de robustez dos operadores do algoritmo genético.....	146
5.3.6.1	Pesos nos resíduos da função objetivo	146
5.3.6.2	Taxa de substituição	148
5.3.6.3	Taxa de cruzamento	151
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	153
6.1	Conclusões	153
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	158
	Referências Bibliográficas.....	161
	Anexo I – Artigo publicado no Congresso ECCOMAS 2016	171
	Anexo II – Artigo submetido e aceite no Congresso TEST&E 2016	189
	Anexo III – Interface - Robot –Excel (Robot API).....	199
	Anexo IV – Algoritmo genético.....	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 — Cardiff Millenium Stadium - Reforço estrutural para controlo de risco de vibrações (SCOSS, 2001).....	2
Figura 1.2 — Frankenstadium em Nuremberga – Vista inferior da bancada com deslocamentos excessivos entre os blocos de bancada (Silva, 2012).....	2
Figura 1.3 — Estádio Octávio Mangabeira (Bahiano, 2007): a) vista geral durante os festejos que antecederam o acidente; b) vista da bancada que colapsou.	3
Figura 1.4 — Excitador de massas excêntrico utilizado nos ensaios (Ellis et al., 2000).....	5
Figura 1.5 — Monitorização das bancadas do estádio Giuseppe Meazza, em Milão (Cigada et al, 2007): a) localização dos sensores na bancada; b) atuador hidráulico e acelerómetros instalados na bancada; c) amplitude das funções de respostas em frequência; d) matriz MAC.....	7
Figura 1.6 — Estádio do Dragão.	10
Figura 1.7 — Tipo de degraus das bancadas do Estádio do Dragão (Figueiras et al., 2004): a) tipo T – bancadas inferiores; b) tipo L – bancadas superiores.....	10
Figura 1.8 — Medição de deslocamentos e extensões a meio vão do degrau de bancada do tipo T (Figueiras et al., 2004).....	11
Figura 1.9 — Ensaio de vibração forçada do degrau de bancada do tipo T (Figueiras et al., 2004): a) martelo de impulsos; b) identificação de pontos de medição da resposta dinâmica.	11
Figura 1.10 — Modelo de elementos finitos do degrau de bancada tipo T (Marques, 2009).	12
Figura 1.11 — Instrumentação dos degraus da bancada norte (Marques, 2009): a) Instalação de LVDT's sob os degraus da bancada norte; b) Instalação de sismógrafo sobre degraus de bancada norte.....	13
Figura 1.12 — Estádio do Algarve (Martins, 2004).	14
Figura 1.13 — Estádio José de Alvalade XXI, Lisboa (Sporting, 2015).	15

Figura 2.1 — Função de Respostas em Frequência: amplitude e fase (adaptado de Magalhães, 2003).	23
Figura 2.2 — Matriz da amplitude das funções de resposta em frequência para dois valores de amortecimento, $\xi=1\%$ (azul) e $\xi=5\%$ (verde) (adaptado de Magalhães, 2003).....	26
Figura 2.3 — Matriz da fase das funções de resposta em frequência para dois valores de amortecimento, $\xi=1\%$ (azul) e $\xi=5\%$ (verde) (adaptado de Magalhães, 2003).....	26
Figura 2.4 — Ensaio de vibração forçada (adaptado de Rodrigues, 2004): a) excitador servo-hidráulico utilizado no EMPA; b) excitador de massas utilizado no Departamento de Barragens do LNEC.	29
Figura 2.5 — Ensaio de vibração livre (Rodrigues, 2004): a) estrutura de ampliação do Aeroporto João Paulo II, na Madeira; b) Ponte Vasco da Gama; c) gráfico do coeficiente de amortecimento do 1º modo de torção da Ponte Vasco da Gama (Caetano <i>et al.</i> , 2010).	30
Figura 2.6 — Ensaio de medição das respostas às ações ambiente da Ponte São Lourenço (Ribeiro, 2012): a) plano de ensaios; b) pormenor dos alinhamentos dos acelerómetros.	31
Figura 2.7 — Técnica de ensaio com pontos de referência fixos (adaptado de Rodrigues, 2004).	33
Figura 2.8 — Métodos de identificação modal estocásticos (adaptado de Rodrigues, 2004).	34
Figura 2.9 — Principais métodos de identificação modal estocástica (adaptado de Rodrigues, 2004).	34
Figura 3.1 — Método iterativo baseado em algoritmos de otimização (adaptado de Ribeiro, 2012).	41
Figura 3.2 — Técnicas de amostragem estocástica (adaptado de Ribeiro, 2012): a) método de Monte Carlo; b) método do Hipercubo Latino.....	43
Figura 3.3 — Matriz AutoMAC entre modos numéricos considerando um conjunto de graus de liberdade (Ewins, 2000): a) alargado b) reduzido.	47
Figura 3.4 — Fluxograma do funcionamento de um algoritmo genético (adaptado de Ribeiro, 2012).	51
Figura 3.5 — Exemplo de aplicação da função de avaliação por classificação: a) resultados de uma população de 20 indivíduos classificados em ordem crescente; b) valores em escala dos indivíduos por aplicação da função de avaliação por classificação.	53
Figura 3.6 — Exemplo aplicação da função de avaliação através de escala proporcional.	54

Figura 3.7 — Exemplo de aplicação da função de avaliação de topo.....	55
Figura 3.8 — Exemplo de aplicação da função de avaliação por substituição linear.	56
Figura 3.9 — Evolução da função objetivo por aplicação função de avaliação por classificação (Rank scaling) e de topo (Top scaling) (adaptado de MathWorks, 2016).....	57
Figura 3.10 — Exemplo de aplicação do método uniforme.	57
Figura 3.11 — Método da roleta russa : a) valores da função de avaliação de uma população de 7 indivíduos; b) roleta russa.....	58
Figura 3.12 — Método de seleção decimal: a) valores da função de avaliação de uma população de 7 indivíduos; b) roleta russa da parte decimal.....	59
Figura 3.13 — Operação de reprodução: a) cruzamento Uniforme; b) cruzamento num ponto; c) cruzamento em dois pontos; d) cruzamento intermédio, heurístico e aritmético.	60
Figura 3.14 — Mutação Gaussiana (adaptado de MathWorks, 2016): a) parâmetro de escala (S) igual a 1; b) parâmetro de escala (S) igual a 0,5.....	62
Figura 3.15 — Estratégias de procura (adaptado de MathWorks, 2016): a) mínimos globais; b) mínimos locais.	65
Figura 3.16 — Evolução da função objetivo e da distância média entre indivíduos de cada geração, num problema de otimização em função do número de gerações (adaptado de MathWorks, 2016): a) evolução da função objetivo; b) evolução da distância média entre indivíduos.	66
Figura 3.17 — Fluxograma da metodologia iterativa de otimização de modelos numéricos.....	67
Figura 3.18 — Fluxograma da aplicação <i>Robot API</i>	69
Figura 4.1 — Estádio do Dragão: a) vista geral; b) vista aérea.	72
Figura 4.2 — Estádio do Dragão, corte Poente – Nascente (adaptado de Marques, 2009).....	72
Figura 4.3 — Estádio do Dragão, corte sul - norte (adaptado de Marques, 2009).....	72
Figura 4.4 — Estádio do Dragão: Planta dos corpos estruturais (GEG, 2002).	73
Figura 4.5 — Consola pré-esforçada da bancada superior (adaptado de Marques, 2009).....	73
Figura 4.6 — Pórtico principal tipo da bancada norte (adaptado de Marques, 2009).....	74
Figura 4.7 — Degraus de bancada do estádio do Dragão.....	74

Figura 4.8 — Geometria dos degraus: a) tipo T (bancada inferior); b) tipo L (bancada superior).....	75
Figura 4.9 — Pormenores de ligação entre degraus: a) ligação rígida (pormenor 1, Figura 4.8a); b) ligação flexível (pormenor 2, Figura 4.8b).....	75
Figura 4.10 — Indicação das ligações rígidas e flexíveis entre degraus de bancada.	76
Figura 4.11 — Pormenor de fixação dos degraus à viga de bancada (pormenor 3, Figura 4.8b).....	76
Figura 4.12 — Zona de apoio dos degraus nas vigas de bancada.....	77
Figura 4.13 — Lugares de bancada do Estádio do Dragão.....	77
Figura 4.14 — Montagem dos degraus de bancada durante construção do Estádio do Dragão (GEG, 2002): a) porosidade elevada na nervura do degrau; b) pormenor do apoio na viga de bancada.	78
Figura 4.15 — Pormenores dos apoios dos degraus de bancada: a) múltiplas camadas de neoprene e cantoneira com calço de neoprene na base; b) cantoneira metálica com calço de neoprene lateral; c) cantoneiras metálicas localizadas em faces diferentes das nervuras dos degraus; d) apoio de degraus sem cantoneira metálica.	79
Figura 4.16 — Pormenores dos apoios dos degraus de bancada existentes no Estádio do dragão: a) selagem com material não identificado; b) fixação dos degraus em cachorros.....	80
Figura 4.17 — Identificação dos degraus de bancada para a fase 2: a) bancada norte (Degrau 1 a 5); b) bancada sul (Degrau 6 a 10).....	82
Figura 4.18 — Fase 1 de ensaios de vibração: identificação dos degraus da bancada sul.	83
Figura 4.19 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 1.	84
Figura 4.20 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 2.	84
Figura 4.21 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 3.	85
Figura 4.22 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 4.	85
Figura 4.23 — Fase 1 de ensaio dinâmico: a) fixação de acelerómetros à estrutura; b) Cabos ordenados e ligações entre cabos protegidas.....	86
Figura 4.24 — Fase 1 do ensaio dinâmico: a) sistema de aquisição de dados; b) computador portátil.	87

Figura 4.25 — Fase 1 do ensaio de vibração: excitação forçada dos degraus de bancada através da ação de pessoas.	88
Figura 4.26 — Fase 1 do ensaio de vibração: interface Gráfica do programa LabView.	88
Figura 4.27 — Método EFDD (Fase 1): seleção de picos das funções dos valores singulares.	89
Figura 4.28 — Método EFDD (Fase 1): estimativa da frequência e do coeficiente de amortecimento do 1º modo de vibração.....	90
Figura 4.29 — Método EFDD (Fase 1): valores singulares médios e normalizados das matrizes dos espectros.....	91
Figura 4.30 — Fase 1: modos de vibração dos degraus de bancada obtidos por via experimental. ...	93
Figura 4.31 — Método EFDD (Fase 1): diagramas de Argand das componentes dos modos de vibração obtidos por via experimental.....	95
Figura 4.32 — Fase 1: matriz de auto-MAC entre os modos de vibração experimentais.	96
Figura 4.33 — Fase 2: configuração de medição.	97
Figura 4.34 — Fase 2: posicionamento dos acelerómetros.....	97
Figura 4.35 — Fase 2: excitação forçada dos degraus de bancada através da ação de pessoas e sistema de aquisição de dados.	98
Figura 4.36 — Fase 2: excitação forçada do degrau de bancada com um indivíduo para avaliação do coeficiente de amortecimento.	99
Figura 4.37 — Método EFDD (Fase 2): seleção de picos das funções de valores singulares.....	100
Figura 4.38 — Frequências naturais obtidas por via experimental (Fase 2): a) modo 1; b) modo 5.	101
Figura 4.39 — Método do decremento logarítmico: registo de acelerações para salto impulsivo nos 10 degraus das bancadas norte e sul.....	103
Figura 4.40 — Coeficientes de amortecimento obtidas por via experimental na bancada norte e sul: a) pós-evento – Zona 1; b) pós-evento – Zona 2.	104
Figura 4.41 — Ensaio de ultra-sons do betão (adaptado de Naik, <i>et al.</i> , 2004): a) princípio de funcionamento; b) equipamento de medição de ultrassónica (marca PROTEC, modelo Tico)...	105
Figura 4.42 — Método de transmissão e receção de ultra-sons: a) direta; b) semi-direta; c) indireta.	106

Figura 4.43 — Localização dos diferentes pontos de medida nos degraus das filas 14 e 15 nos alinhamentos dos degraus 7 e 8: a) corte transversal da nervura; b) alçado da nervura; c) corte longitudinal da nervura.....	109
Figura 4.44 — Ensaio de ultra-sons do betão: a) posicionamento dos transdutores; b) identificação do posicionamento de armaduras.	110
Figura 4.45 — Valores do tempo de propagação dos ultra-sons em diferentes localizações dos degraus da bancada sul: a) degrau da Fila 14 do alinhamento do degrau 7; b) degrau da Fila 15 do alinhamento do degrau 7; c) degrau da Fila 14 do alinhamento do degrau 8; d) degrau da Fila 15 do alinhamento do degrau 8.....	111
Figura 4.46 — Relação empírica entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos do betão (BS 1881, 1986).	112
Figura 4.47 — Estimativa dos valores do módulo de elasticidade dinâmico do betão.	112
Figura 5.1 — Modelo numérico dos degraus de bancada: a) vista geral tridimensional; b) pormenor das ligações entre os degraus e dos apoios dos degraus.....	117
Figura 5.2 — Ligação entre o patamar e a nervura dos degraus com material sem massa, e troço rígido nas ligações rígidas e flexíveis na interceção do patamar e da nervura.....	117
Figura 5.3 — Representação dos valores médios da resistência à compressão do betão aplicado comparativamente a betões da classe C30/47 e C40/50.....	119
Figura 5.4 — Evolução do módulo de elasticidade do betão aplicado comparativamente a betões da classe C30/45 e C40/50.....	121
Figura 5.5 — Configurações modais dos modos 3, 7, 9, 13 e 20 do modelo numérico.....	124
Figura 5.6 — Configurações modais experimentais e numéricas antes da calibração.....	126
Figura 5.7 — Variação dos resultados do emparelhamento de modos de vibração experimental/numérico em função do número de degraus de bancada.....	128
Figura 5.8 — Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros numéricos e as respostas do modelo dos degraus de bancada.....	131
Figura 5.9 — Gráficos de Anthill: a) módulo de elasticidade do betão vs frequência do modo 1; b) módulo de elasticidade do aço da cantoneira metálica vs frequência do modo 4.....	132

Figura 5.10 — Distribuição dos valores das frequências naturais obtidos com base análise de sensibilidade.	133
Figura 5.11 — Distribuição dos valores do parâmetro MAC obtidos na análise de sensibilidade.	134
Figura 5.12 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA1, para um total de 100 gerações.	136
Figura 5.13 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA2.	136
Figura 5.14 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA3.	137
Figura 5.15 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA4.	137
Figura 5.16 — Evolução dos valores mínimos da função objetivo em função do número de gerações para os casos de otimização GA1 a GA4.	138
Figura 5.17 — Valores da função objetivo para os casos de otimização GA1 a GA4.	138
Figura 5.18 — Valores dos parâmetros numéricos obtidos para os casos de otimização GA1 a GA4: a) parâmetros globais e das interfaces entre os degraus; b) parâmetros das interfaces dos degraus com as vigas de bancada.....	139
Figura 5.19 — Valores das respostas obtidas para os casos de otimização GA1 a GA4: a) rácios percentuais entre as frequências numéricas e experimentais; b) parâmetros MAC.	141
Figura 5.20 — Desvios das frequências de vibração numéricas obtidas, em relação ao valor médio das frequências de vibração experimentais, para os casos de otimização GA1 a GA4.....	141
Figura 5.21 — Parâmetros modais antes e após a calibração: a) frequências de vibração; b) parâmetro MAC.....	142
Figura 5.22 — Desvio das frequências de vibração numéricas antes e após a calibração, em relação ao valor médio das frequências experimentais.	143
Figura 5.23 — Configurações modais experimentais e numéricas antes da calibração.....	145
Figura 5.24 — Valores da função objetivo para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2.	146

Figura 5.25 — Resultados modais para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2: a) frequências de vibração; b) parâmetros MAC.	147
Figura 5.26 — Desvio das frequências de vibração numéricas, em relação ao valor médio das frequências experimentais, para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2.	148
Figura 5.27 — Evolução da função objetivo e dos parâmetros em função da taxa de substituição e do número de gerações: a) função objetivo; b) E_c ; c) E_{M20} ; d) E_{EPDM} ; e) $E_{N,0}$; f) $E_{N,13E}$; g) $E_{N,13D}$; h) $E_{N,14E}$; i) $E_{N,14D}$; j) $E_{N,15D}$	149
Figura 5.28 — Evolução da função objetivo e dos parâmetros em função da taxa de cruzamento e do número de gerações: a) função objetivo; b) E_c ; c) E_{M20} ; d) E_{EPDM} ; e) $E_{N,0}$; f) $E_{N,13E}$; g) $E_{N,13D}$; h) $E_{N,14E}$; i) $E_{N,14D}$; j) $E_{N,15D}$	151

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Resumo das frequências de vibração do modelo numérico dos degraus (Marques, 2009).	12
Quadro 1.2 – Valores RMS e do pico da aceleração e frequências registadas dos degraus instrumentados no evento do dia 25 de abril (Marques, 2009).	13
Quadro 1.3 – Valores RMS e do pico da aceleração e frequências registadas nos degraus instrumentados no evento do dia 28 de abril (Marques, 2009).	14
Quadro 4.1 – Características técnicas dos acelerómetros piezoelétricos.	86
Quadro 4.2 – Características técnicas dos módulos NI 9234 para acelerómetros.	87
Quadro 4.3 – Método EFDD (Fase 1): parâmetros modais.	92
Quadro 4.4 – Características técnicas dos módulos NI 9233 para acelerómetros.	98
Quadro 4.5 – Método EFDD (Fase 2): parâmetros modais do 1º modo de flexão.	101
Quadro 4.6 – Relação empírica entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico do betão com a velocidade de propagação de ultra-sons.	108
Quadro 5.1 – Caracterização dos parâmetros do modelo numérico dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão.	118
Quadro 5.2 – Resultados de ensaios de rotura por compressão em provetes de betão dos degraus de bancada do estádio do dragão (adaptado de Figueiras, 2004).	119
Quadro 5.3 – Parâmetros modais obtidos por via numérica.	123
Quadro 5.4 – Informação dos modos de vibração experimentais utilizados na calibração do modelo numérico dos degraus de bancada.	127
Quadro 5.5 – Caracterização dos parâmetros do modelo numérico dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão.	129

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos últimos anos, a organização de eventos desportivos de escala internacional, sobretudo em países europeus, tem lançado novos desafios ao nível da reabilitação e reconstrução dos estádios de futebol existentes e, em alguns casos, na construção de novos estádios.

A necessidade de reduzir os obstáculos à frente do público obrigou a que os estádios fossem construídos com recurso a elementos de maior vão e mais esbeltos. Esta situação tornou as estruturas mais suscetíveis a fenómenos de ressonância, sobretudo devido à aproximação das frequências associadas aos movimentos sincronizados do público às frequências de vibração próprias da estrutura (SCOSS, 2001).

As novas exigências funcionais dos recintos desportivos, sobretudo as associadas à segurança e conforto dos espectadores, têm levado a um crescente interesse dos investigadores pelo estudo dos efeitos dinâmicos induzidos pelo público neste tipo de estruturas (SCOSS, 2001). Estes estudos envolvem geralmente a realização de ensaios dinâmicos e o desenvolvimento de modelos numéricos de elementos finitos de apoio à decisão e calibrados com base em informação experimental (SCOSS, 2001).

No Reino Unido foi particularmente divulgado o caso do Estádio *Cardiff Millennium Stadium* (Figura 1.1), inaugurado em 2000, que logo teve após a sua inauguração viu algumas bancadas serem reforçadas com escoras provisórias para controlar o risco de vibrações excessivas durante a realização de concertos de música (SCOSS, 2001).



Figura 1.1 — Cardiff Millenium Stadium - Reforço estrutural para controlo de risco de vibrações (SCOSS, 2001).

Outro exemplo é o estádio Frankenstadion em Nuremberga, Alemanha (Figura 1.2), que começou a exibir deslocamentos significativos nas bancadas do anel superior, devido às ações cíclicas geradas pelos espetadores durante eventos desportivos. Os responsáveis do recinto afirmaram que se trataria de uma situação espectacular e sem risco para a segurança pública (Silva, 2012).



Figura 1.2 — Frankenstadion em Nuremberga – Vista inferior da bancada com deslocamentos excessivos entre os blocos de bancada (Silva, 2012).

Em alguns casos, ocorreram situações dramáticas, como foi o sucedido no estádio Octávio Mangabeira, localizado no estado da Bahia, Brasil. Durante a realização de um jogo de futebol parte da arquibancada colapsou resultando na morte de sete pessoas e mais de 40 feridos (Figura 1.3). Após o acidente o estádio foi encerrado e demolido tendo sido construído um novo estádio onde inclusivamente se realizaram jogos do Mundial de Futebol de 2014 (Bahiano, 2007).



Figura 1.3 — Estádio Octávio Mangabeira (Bahiano, 2007): a) vista geral durante os festejos que antecederam o acidente; b) vista da bancada que colapsou.

O aparecimento de situações com potencial risco, em estádios de futebol, levou o *Standing Committee on Structural Safety*, do Reino Unido, a lançar um alerta através de um relatório denominado *SCOSS Thirteenth Report*, publicado em 2001 (SCOSS, 2001). Neste relatório foi identificado um problema que reside no facto das estruturas serem cada vez mais realizadas com grandes vãos e elevadas esbeltezas o que provoca uma diminuição das frequências próprias, por vezes, para valores dentro do intervalo de frequência devidas às ações induzidas pelo público.

Marques, (2009) refere que a generalidade das bancadas de estádios de futebol são projetadas com base em cargas estáticas. Admiravelmente é realizada uma verificação que consiste em assegurar que a frequência própria da bancada está acima de uma frequência gerada de referência, tipicamente 6 Hz. Este procedimento simplificado tem evidentes limitações (IStructE, 2001).

A avaliação do comportamento dinâmico das estruturas é geralmente baseada em análises dinâmicas dos modelos numéricos de elementos finitos e que reproduzem as ações impostas pelo público.

Neste contexto torna-se especialmente relevante a calibração experimental de modelos numéricos, geralmente com recurso a ensaios dinâmicos que envolvem a identificação de parâmetros modais, nomeadamente as frequências próprias, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento. A calibração dos modelos numéricos tem como objetivo garantir que os resultados das simulações numéricas se aproximem dos resultados da estrutura real.

Com o presente trabalho pretende-se dar um contributo para o estudo do comportamento dinâmico de degraus de bancada de estádios, procurando aprofundar algumas especificidades ao nível da

modelação numérica, ensaios dinâmicos e calibração experimental com base em técnicas avançadas de otimização.

1.2 INVESTIGAÇÕES ANTERIORES

Os primeiros trabalhos na área da avaliação experimental do comportamento dinâmico de bancadas em recintos desportivos datam da década de 70 do século XX, e curiosamente todos eles nos Estados Unidos da América.

Em 1975, a bancada superior do *Iowa State University* foi instrumentada com transdutores de deslocamento no decorrer de eventos desportivos e foi registada a respetiva resposta dinâmica em acelerações (Greimann e Klaiber, 1978). Em 1979, Tuan com o mesmo propósito, efetuou medições na bancada superior do *University of Wisconsin Stadium* (Tuan, 1983). No *University of Illinois Memorial Stadium* movimentos perturbadores para os utilizadores motivaram a monitorização da resposta dinâmica das suas bancadas (Wilkinson, 1991). Kasperski investigou a influência do número de ocupantes na resposta dinâmica em acelerações e das frequências de vibração de uma bancada real tendo em vista o estabelecimento de limites destes parâmetros compatíveis com o conforto dos ocupantes (Kasperski e Niemann, 1993).

O *British Research Establishment* iniciou em 1991 uma extensa série de ensaios experimentais tendo em vista a avaliação das características dinâmicas de bancadas durante a realização de eventos e sujeitas a diferentes formas de carregamento (Littler, 2005).

No âmbito deste projeto, e ao longo de 5 anos foram testadas cinquenta bancadas amovíveis das quais cerca de metade foram monitorizadas durante a realização de eventos desportivos. Foram ainda realizados ensaios em sessenta bancadas permanentes, com recurso a um excitador de massas excêntricas (Figura 1.4) ou apenas em vibração ambiental para obter as suas frequências próprias e modos de vibração.

Os ensaios sob ação do público envolveram sobretudo a medição das acelerações na direção vertical em todas as bancadas, e a resposta na direção longitudinal e transversal em algumas. A medição das respostas na direção longitudinal e transversal são particularmente importantes na realização de ensaios em bancadas amovíveis, onde, normalmente, as frequências apresentam valores mais baixos. No caso de bancadas permanentes a medição da resposta na direção longitudinal e transversal tornam-se particularmente úteis quando se pretende analisar a bancada num todo. Os resultados

destas observações foram publicados por Littler em diversos trabalhos (Littler, 1999), (Littler, 1998), (Littler e B.R., 2000) e (Littler, 2002). A interação dinâmica entre a estrutura e a multidão, modelos de carga a adotar na análise e dimensionamento de bancadas e a modelação numérica mais adequada com base nos ensaios experimentais realizados são também apresentados por Ji e Ellis (Ellis e Ji, 1997), (Ji e Ellis, 1999) e (Ellis et al, 2000).

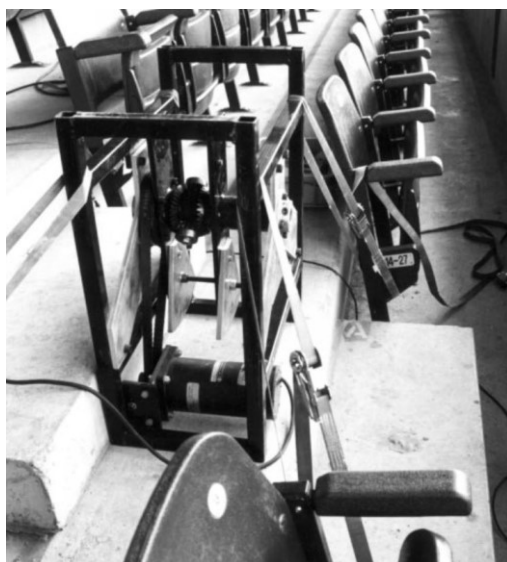


Figura 1.4 — Excitador de massas excêntrico utilizado nos ensaios (Ellis et al., 2000).

Reynolds e Pavic (2002) descrevem os ensaios realizados na arquibancada de um estádio no Reino Unido, tendo em vista a calibração do modelo numérico de elementos finitos desenvolvido por um projetista de estádios experiente. O ensaio dinâmico de identificação dos parâmetros modais foi realizado com recurso a seis acelerómetros e um excitador de massas eletrodinâmico. Os resultados obtidos com recurso a um excitador de massas foram bem sucedidos sobretudo na estimativa dos principais propriedades modais verticais da estrutura. No entanto na direção transversal mostram-se incapazes de excitar convenientemente a estrutura para análise dos modos nessa direção devido à baixa amplitude das acelerações geradas (Reynolds e Pavic, 2002).

Sachse et al (2003) investigaram as propriedades modais numéricas de uma bancada com espetadores com base num sistema dinâmico simplificado com dois graus de liberdade. Propuseram-se ainda explicar algumas curiosas alterações de frequências naturais e coeficientes de amortecimento, obtidos em medições experimentais anteriores com base no facto de estas se encontrarem ocupadas ou vazias. Concluem que a influência do público nas propriedades modais de uma estrutura pode ser tão significativa que não pode ser ignorada no modelo numérico nem nas verificações regulamentares de projeto. Infelizmente a massa, a rigidez e o coeficiente de amortecimento do corpo humano são difíceis

de quantificar para fins de projeto, pois dependem fortemente do que os espetadores estão a fazer. Acresce ainda que as frequências naturais dos graus de liberdade relacionados com os espetadores são difíceis de especificar pois dependem da postura dos membros dos espetadores bem como da direção e do nível de vibração (Sachse, et al., 2004).

Reynolds e Pavic (2004) e Mohanty et al (2005), apresentam os resultados através de um sistema de monitorização remota da arquibancada do estádio de Bradford, no Reino Unido. Com este sistema foram adquiridas as respostas de vibração com as bancadas do estádio vazio e ocupado durante jogos de futebol e de rugby. Este estudo permitiu concluir que os modos de vibração com a bancada ocupada por pessoas são diferentes dos que são obtidos com a bancada vazia. A presença do público tem ainda um efeito significativo nos valores das frequências naturais e coeficientes de amortecimento da bancada. Os coeficientes de amortecimento tendem a ser máximos quando o público está de pé e a bater palmas, possivelmente até a saltar. Verificaram ainda que com as elevadas vibrações medidas durante os festejos de golo são causadas não só pelo acréscimo da excitação dinâmica, mas também pela redução do coeficiente de amortecimento que acontece ao mesmo tempo (Reynolds e Pavic, 2004) (Mohanty et al, 2005).

Caprioli et al (2006) realizou um estudo que compara as respostas dinâmicas em condições de serviço de dois estádios de futebol, o estádio Giuseppe Meazza, em Milão, e o estádio Old Trafford, em Manchester. As medições decorreram durante a realização de um evento de música ao vivo realizado pelo mesmo grupo de música. Os resultados do estudo permitiram concluir que os níveis de acelerações mais acentuados ocorreram no estádio onde os espetadores falam a mesma língua do grupo de música, dando a entender que a perceção da língua melhora o efeito de sincronismo dos espetadores (Caprioli *et al.*, 2006).

No âmbito de um projeto que envolveu o *Politecnico di Milano*, foram realizados vários estudos no âmbito da análise do comportamento dinâmico de bancadas de estádios de futebol. Cigada et al (2007) estudaram o comportamento de uma parte da sub-estrutura da bancada do estádio, Giuseppe Meazza, em Milão, no qual realizaram testes dinâmicos baseados na medição de vibrações durante a realização de eventos públicos (bancadas cheias de pessoas) e com o estádio vazio. Neste estudo desenvolveram um modelo de elementos finitos do 3º anel da bancada do estádio para comparar os parâmetros modais do modelo numérico com os resultados experimentais. O ensaio experimental envolveu o recurso a um atuador hidráulico estrategicamente localizado na bancada. O modelo numérico serviu de base para a seleção dos locais a instalar os acelerómetros utilizados na monitorização permanente

das bancadas do estádio de modo a obter as maiores amplitudes de vibração, possibilitando assim a identificação do maior número de frequências de ressonância (Figura 1.5).

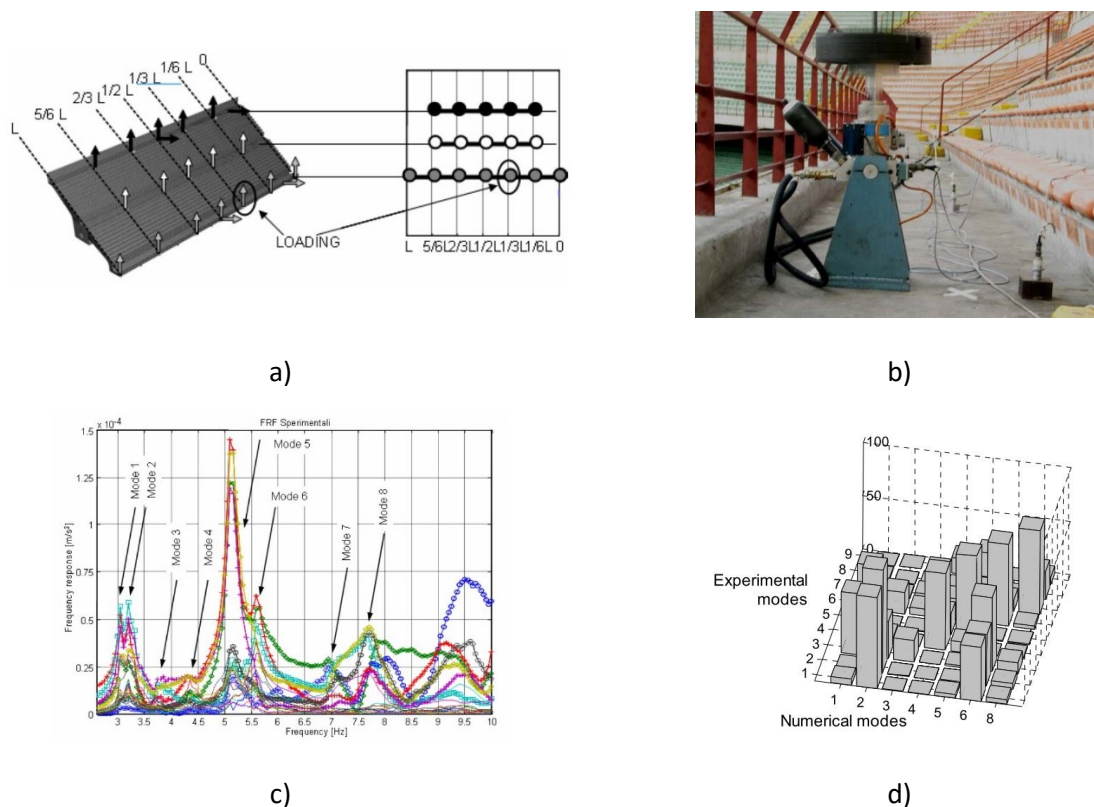


Figura 1.5 — Monitorização das bancadas do estádio Giuseppe Meazza, em Milão (Cigada et al, 2007): a) localização dos sensores na bancada; b) atuador hidráulico e acelerómetros instalados na bancada; c) amplitude das funções de respostas em frequência; d) matriz MAC.

Cigada *et al.* (2008) ainda no âmbito da monitorização do estádio Giuseppe Meazza, propuseram-se identificar a evolução da estimativa dos parâmetros modais do 3º anel da bancada, com base na informação recolhida ao longo de mais de um ano, incluindo registo relativos à realização de eventos, tais como jogos de futebol e concertos de música ao vivo. Com os resultados obtidos pretendiam que, futuramente, estes servissem de base para estabelecer intervalos de confiança para a identificação de frequências, assim como a identificação de potenciais anomalias, e também poderem ser utilizados como referência em simulações numéricas para previsão de condições particulares de dano.

Caprioli e Vanali (2009) compararam os resultados das amplitudes de vibração medidas em condições de serviço, classificados de acordo com o tipo de evento, com os valores de referência sugeridos em normas internacionais (BS 6841, 1987; ISO 2631-1, 1997; ISO 2631-2, 2003) e com outros limites propostos na literatura. Concluíram que, por comparação dos limites constantes nas normas

internacionais e na literatura de referência, estes terão de ser revistos por não serem representativos de situações reais. Propõem que, para estabelecer limites mais realistas, deverão ser analisados mais eventos com vista à criação de uma base de dados.

Vanali (2009) desenvolveu um algoritmo automático baseado num modelo de análise experimental operacional que permitiu extrair os parâmetros modais do 3º anel do estádio Giuseppe Meazza ao longo de três meses. O algoritmo permitiu realizar a seleção do menor número de semanas onde a identificação dos parâmetros modais pode ser considerada robusta e retirar a primeira estimativa do efeito da temperatura nas frequências modais.

Saudi *et al.* (2009) calibraram um modelo de elementos finitos tridimensional de uma bancada em consola do estádio Elland Road East Stand, em Leeds, no Reino Unido, com base numa análise modal experimental que permitiu identificação de alguns dos modos globais da estrutura. A calibração do modelo numérico de elementos finitos, demonstraram uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos.

Marovic *et al.* (2009) realizaram ensaios estáticos e dinâmicos em degraus de bancada simplesmente apoiados, nas bancadas do Spaladium Arena, na Cidade de Split, na Croácia. Os resultados experimentais, nomeadamente, deslocamentos verticais máximos, tensões e respostas dinâmicas, estão dentro dos limites teóricos. Os ensaios confirmaram as hipóteses, estática e dinâmica.

Catbas *et al.* (2010) estudaram o comportamento dinâmico de uma bancada em estrutura metálica, com base nas acelerações a que a estrutura fica sujeita durante a realização de jogos de futebol tendo identificado os eventos responsáveis pela sua vibração excessiva (Festejos, músicas populares, etc.). Realizaram ainda uma comparação das respostas em diferentes locais do estádio durante a realização de diferentes eventos. Por último, estabeleceram recomendações baseados nos resultados obtidos e a serem explorados no projeto das bancadas, nomeadamente a calibração de modelos numéricos de elementos finitos com base na informação experimental. Num outro estudo Catbas *et al.* (2010), definiram níveis de vibração em correspondência com diferentes níveis de conforto humano para diferentes tipos de eventos.

Jones *et al.* (2011) elaboraram uma revisão das técnicas base a considerar em ensaios dinâmicos de bancadas. Verificaram que os modelos numéricos têm limitações, onde o sistema pessoa-estrutura é considerado apenas como um fator no modelo de forças, e a energia de excitação, existente entre frequências harmónicas, a partir de movimentos descoordenados dos espectadores, é ignorada.

Concluem que é necessário mais trabalho em todas as fases do processo de avaliação de vibração na fase de projeto de estruturas, concentrando-se principalmente na melhoria da precisão e verificação de resultados em estruturas reais e também durante a realização de eventos.

Setareh et al. (2011) analisaram os registos de um sistema remoto de monitorização de vibração instalado numa bancada em consola de grandes dimensões. Os resultados revelaram que a presença de público resulta numa redução significativa das frequências naturais da estrutura e aumenta os coeficientes de amortecimento em modos de vibração com frequências mais elevadas. Para o primeiro modo, que corresponde ao modo mais vulnerável à excitação atribuída aos movimentos dos espetadores, a redução da frequência natural depende da postura dos ocupantes, que apresenta uma maior redução quando os espetadores estão de pé e envolvidos em atividades rítmicas.

Jones *et al.* (2011) baseados em resultados de ensaios dinâmicos realizados nos anos de 2004 e 2005 no estádio do Manchester City, no Reino Unido, demonstraram como os fatores de amplificação dinâmica constantes das normas existentes (Canadianas, normas ISO e normas do Reino Unido) são uma envolvente dos fatores dinâmicos obtidos experimentalmente.

Lima et al. (2013) desenvolveram um modelo de elementos finitos tridimensional das bancadas do Estádio Nacional do Brasil, em Brasília, e realizaram uma análise dinâmica numérica sob ação do público, e para diferentes disposições de carga. A comparação dos resultados, em acelerações, com os limites impostos pela regulamentação internacional confirma a satisfação dos requisitos.

Brito *et al.* (2014) realizaram um estudo em bancadas temporárias sujeitas a ações dinâmicas devido aos espetadores e a problemas de vibrações excessivas que têm vindo a ser observadas neste tipo de estruturas.

1.3 INVESTIGAÇÕES ANTERIORES REALIZADAS EM PORTUGAL

Em Portugal, com a realização do Campeonato Europeu de Futebol (EURO 2004), houve a necessidade de reabilitar e reconstruir alguns dos estádios de futebol existentes e, em alguns casos, a construção de estádios novos.

Os novos estadios de futebol foram construídos com elementos estruturais mais esbeltos e de vãos mais elevados, comparativamente aos estádios de futebol que existiam anteriormente, o que provocou na comunidade científica portuguesa um interesse acrescido, principalmente na área da

análise dinâmica de estruturas. Contudo, os estudos realizados neste âmbito ainda são reduzidos, comparativamente a outros países como os Estados Unidos, Reino Unido e Itália.

Foi possível identificar estudos anteriormente realizados no âmbito do comportamento dinâmico das bancadas do Estádio do Dragão, no Porto, Estádio do Algarve, em Loulé e no Estádio José de Alvalade, em Lisboa.

No âmbito da construção do Estádio do Dragão (Figura 1.6), em 2004, foram realizados ensaios estáticos em degraus de bancada pelo LABEST – Laboratório de Betão Estrutural da FEUP (Figueiras et al., 2004) e que envolveram a monitorização de um conjunto de quatro degraus de bancada, dois degraus do tipo T e dois degraus do tipo L (Figura 1.7). O ensaio foi realizado em ambiente de laboratório com recurso a LVDT's para a medição de deslocamentos, extensómetros e *Clip gages* para medição de extensões (Figura 1.8).



Figura 1.6 — Estádio do Dragão.

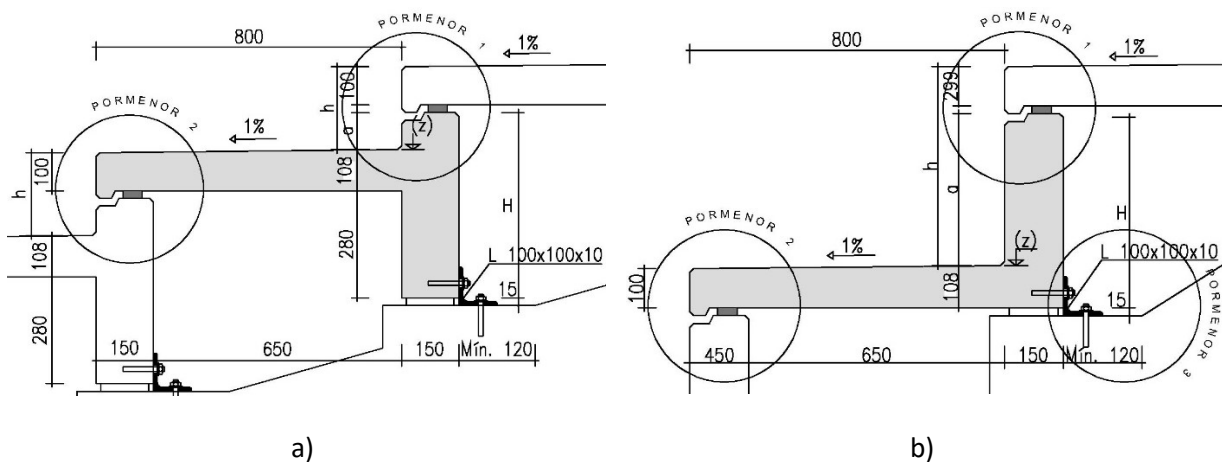


Figura 1.7 — Tipo de degraus das bancadas do Estádio do Dragão (Figueiras et al., 2004): a) tipo T – bancadas inferiores; b) tipo L – bancadas superiores.

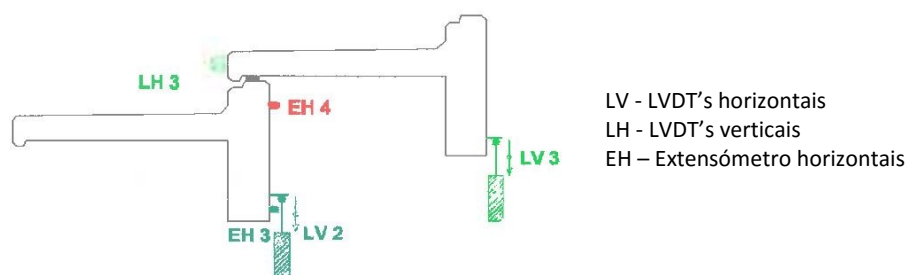


Figura 1.8 — Medição de deslocamentos e extensões a meio vão do degrau de bancada do tipo T (Figueiras et al., 2004).

Em 2004 foram também realizados ensaios dinâmicos aos dois tipos de degraus de bancada, (tipo T e tipo L), desta feita da responsabilidade do VIBEST – Laboratório de Vibrações e Monitorização de Estruturas (Caetano et al. , 2004). Os ensaios envolveram a vibração forçada de degraus de bancada com recurso a um martelo de impulsos (Figura 1.9a). A resposta dinâmica foi medida por intermédio de acelerómetros piezoelétricos distribuídos nos degraus em pontos previamente definidos (Figura 1.9b). Foram também medidas respostas em vibração livre dos degraus resultantes do salto de um indivíduo. Deste estudo concluiu-se que os degraus apresentam um valor da frequência fundamental de vibração de 9,65 Hz, para os degraus do tipo T, e 9,67 Hz, para os degraus do tipo L.

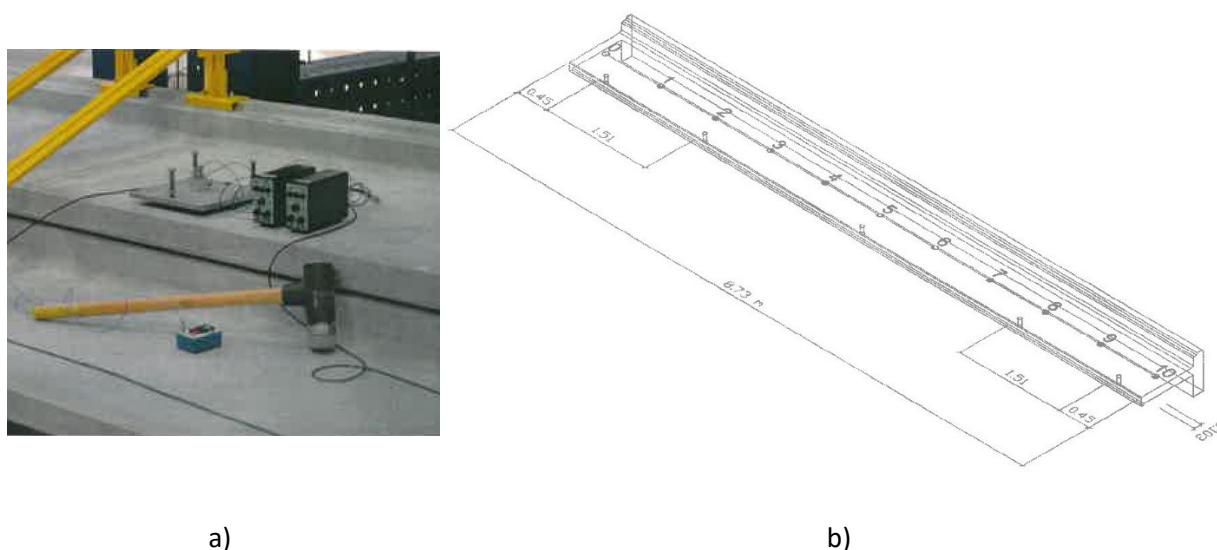


Figura 1.9 — Ensaio de vibração forçada do degrau de bancada do tipo T (Figueiras et al., 2004):
 a) martelo de impulsos; b) identificação de pontos de medição da resposta dinâmica.

Marques (2009) pretendeu explorar, de forma consistente, os aspetos do dimensionamento estrutural de estádios em particular ao nível da consideração das ações dinâmicas induzidas pelos espetadores.

No âmbito do estudo foi desenvolvido um modelo numérico de elementos finitos do degrau de bancada tipo T (Figura 1.10), tendo sido comparados os resultados obtidos para as respostas induzidas pela ação do público com os limites impostos pelas normas internacionais e bibliografia de referência. Dos resultados obtidos através do modelo numérico, Marques (2009) obteve uma frequência no 1º modo de vibração de 9,75 Hz (Quadro 1.1), constatando uma boa aproximação aos resultados obtidos em laboratório, no qual se obteve uma frequência no 1º modo de vibração de 9,65 Hz (Caetano et al, 2004).

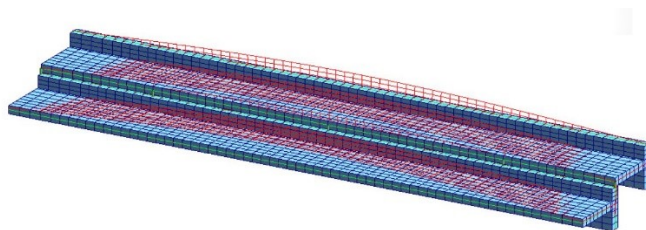


Figura 1.10 — Modelo de elementos finitos do degrau de bancada tipo T (Marques, 2009).

Quadro 1.1 – Resumo das frequências de vibração do modelo numérico dos degraus (Marques, 2009).

Modo	Frequência (Hz)	Mas.rel.UX (%)	Mas.rel.UY (%)	Mas.rel.UZ (%)	Mas.corr.UX (%)	Mas.corr.UY (%)	Mas.corr.UZ (%)
1	9,75	0,05	0,37	79,62	0,05	0,37	79,62
2	18,39	0,17	8,10	80,22	0,12	7,73	0,60
3	22,08	1,25	79,83	81,07	1,08	71,73	0,85
4	35,46	1,38	79,83	81,07	0,14	0,00	0,00
5	38,76	1,38	79,87	81,21	0,00	0,03	0,14
6	51,80	1,71	79,87	81,21	0,32	0,00	0,00

Foram ainda realizados modelos numéricos de elementos finitos dos 12 corpos que constituem as bancadas do Estádio do Dragão, e realizadas análises dinâmicas com base nos diversos modelos de carga de normas internacionais e bibliografia de referência.

Por último, foram realizados ensaios *in situ* da bancada norte do Estádio do Dragão, especificamente, nos sectores 26 e 27 sobre os degraus 16 e 17 que têm a geometria em “T”. A instrumentação utilizada durante os ensaios passou pela colocação de LVDT’s, estrategicamente colocados sob os degraus (Figura 1.11), para obter leituras em termos de deslocamentos, e a utilização de um sismógrafo para obter leituras em termos de acelerações.



Figura 1.11 — Instrumentação dos degraus da bancada norte (Marques, 2009): a) Instalação de LVDT's sob os degraus da bancada norte; b) Instalação de sismógrafo sobre degraus de bancada norte.

Os ensaios realizados passaram pela monitorização de um jogo de futebol que decorreu no dia 25 de abril de 2009, coincidente com a comemoração da conquista pelo Futebol Clube do Porto do título de campeão nacional desse ano, evento no qual o estádio se apresentava com as bancadas completamente ocupadas. Dos ensaios obteve-se uma frequência de 12,5 Hz correspondente ao 1º modo de vibração dos degraus (Quadro 1.2).

Quadro 1.2 – Valores RMS e do pico da aceleração e frequências registadas dos degraus instrumentados no evento do dia 25 de abril (Marques, 2009).

Evento	Duração (s)	Aceleração de pico (cm/s^2)	f1 (Hz)	Aceleração RMS (cm/s^2)
A1	92	50	11,23	2,75
A2	12,5	28	13,09	3,65
A3	46	185	12,5	8,62
A4	35	35	12,9	1,99
A5	105	40	12,5	3,44
A6	86	37	12,7	3,66
A7	94	36	13,18	3,86

Três dias depois, no dia 28 de abril de 2009, foram realizados ensaios aos mesmos degraus de bancada com recurso a um grupo de voluntários constituídos por 34 indivíduos que executaram um conjunto de saltos em gamas de frequências. Os resultados obtidos experimentalmente serão confrontados com os estimados através dos modelos numéricos. Dos ensaios realizados obteve-se uma frequência de 10,45 Hz correspondente ao 1º modo de vibração dos degraus (Quadro 1.3).

Quadro 1.3 – Valores RMS e do pico da aceleração e frequências registadas nos degraus instrumentados no evento do dia 28 de abril (Marques, 2009).

Evento	Duração (s)	Aceleração de pico (cm/s^2)	f1 (Hz)	Aceleração RMS (cm/s^2)
E1	25	871	10,45	147,15
E2A	18	1238	10,45	179,96
E2B	8	744	12,11	131,51
E3	20	1100	10,45	174,79
E4	12	668	10,25	179,67
E5	17	855	10,25	95,62
E5	36	922	10,16	137,97
E6	3	356	10,16	103,85
E6	2	638	10,94	127,71
E11	42	785	10,45	111,40
E12	7	760	12,7	124,79
E12	7	521	10,74	120,51
E12	6	615	10,35	136,23
E14	20	964	10,64	88,86
E15	20	992	10,63	140,35
E16B	15	715	10,35	128,2
E17A	15	1075	10,55	196,5

Marques (2009) conclui ainda que a ação sincronizada dos espetadores induz nos degraus níveis de aceleração superiores aos registados durante um jogo de futebol. Verificou também que os modos de vibração locais contribuem mais significativamente para a resposta em aceleração, e em comparação com os modos de vibração globais.

Martins (2004) realizou o estudo dinâmico da bancada poente do Estádio do Algarve (Figura 1.12), com recurso a um modelo tridimensional de elementos finitos. Foi elaborada uma análise modal de toda a bancada além de se reproduzir o efeito da ação dinâmica do público durante espetáculos, quer sejam jogos de futebol ou concertos de música.



Figura 1.12 — Estádio do Algarve (Martins, 2004).

Neste estudo concluiu-se que a devido à elevada flexibilidade da estrutura metálica da bancada poente, esta não estava preparada para suportar o conjunto de ações a que iria estar sujeita, tendo sido elaborado um conjunto de recomendações que os intervenientes na construção do estádio

acataram e que envolveria o reforço de vários apoios, de modo a aumentar a sua capacidade dissipativa, e o aumento da secção de elementos estruturais de modo a aumentar a sua rigidez global, e assim aumentar as suas frequências naturais.

Silva (2012) realizou a análise de vibrações dos degraus de bancada do estádio José de Alvalade XXI (Figura 1.13), em Lisboa.



Figura 1.13 — Estádio José de Alvalade XXI, Lisboa (Sporting, 2015).

O autor realizou ensaios em duas bancadas do 2º anel do Estádio, com localizações distintas. Estes ensaios foram realizados com recurso a sensores de velocidade com gravação de dados, tendo-se utilizado 15 voluntários, os quais simularam vários tipos de saltos nas duas localizações apresentadas pelo autor. Posteriormente procedeu-se à monitorização de um jogo de futebol, de modo a obterem-se resultados face a uma situação real e em diferentes situações associadas a comemorações dos adeptos. Por fim, elaborou-se um modelo de elementos finitos das duas bancadas analisadas, as quais são constituídas por degraus intermédios do tipo T e degraus do tipo L nos topos, e realizaram-se análises considerando-se os modelos de ações dinâmicas propostas nas normas e bibliografia internacionais recomendadas. Comparando os resultados dos ensaios com os resultados numéricos verificou-se existir situações de vibrações excessivas tendo-se proposto, como medida mitigadora, uma possível implementação de amortecedores do tipo AMS nos degraus de bancada. Para o efeito foram estudados cinco propostas de amortecedores, tendo-se concluído que a solução com recurso a três AMS era a mais vantajosa para reduzir os níveis de aceleração nos degraus de bancada.

O levantamento dos estudos realizados, no âmbito do comportamento dinâmico de bancadas de estádios de futebol, incidiu, sobretudo, na análise do comportamento dinâmico global de bancadas. Poucos são os autores que direcionaram o seu estudo para o estudo do comportamento dinâmico local dos degraus de bancada, exceção feita aos estudos levados a cabo por Marques, (2009), no Estádio do Dragão, e por Silva (2012), no Estádio José de Alvalade XXI.

1.4 MOTIVAÇÃO, OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O tema da presente dissertação centra-se na avaliação experimental e numérica do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão, situado na cidade do Porto.

Uma das premissas que o Futebol Clube do Porto incorpora na política de qualidade do Estádio do Dragão é a satisfação e conforto dos adeptos na utilização do estádio. Neste âmbito propõe-se, em todas as situações de insatisfação, dar resposta às reclamações apresentadas por parte dos adeptos de modo a garantir um elevado nível de qualidade dos serviços prestados. Recentemente surgiu uma reclamação de um adepto que afirmou ter sentido enjoos durante a realização de um jogo de futebol. O adepto estava a assistir ao evento desportivo na bancada nascente inferior (sector 20).

Com esta reclamação a empresa gestora do Estádio do Dragão, a PortoEstádio, Gestão e Exploração de Equipamentos Desportivos, SA, demonstrou interesse na colaboração com o ISEP ao nível de realização de estudos específicos às bancadas do estádio de modo a verificar a legitimidade e veracidade da reclamação apresentada.

O comportamento dinâmico das bancadas do Estádio do Dragão já foi alvo de um estudo por parte de Marques (2009). No entanto, os estudos realizados centraram-se sobretudo na análise numérica dos corpos que compõem as bancadas do Estádio do Dragão, e foram mais limitados no que toca ao estudo do comportamento dos degraus de bancada.

Curiosamente, Marques (2009), apontou para a importância de se desenvolver uma campanha de ensaios mais exaustiva salientando que *“(...) Seria também de grande utilidade proceder a nova campanha de ensaios, em condições melhor controladas, que permitissem colher mais resultados em diferentes áreas da bancada de forma a ser possível estabelecer mais comparações entre os modelos e a resposta da estrutura construída.(...)”*.

Associado à possibilidade de haver alguma degradação nos sistemas de apoio, poderá estar a verificar-se uma alteração do comportamento dinâmico destes elementos, podendo, eventualmente, dar origem a um aumento dos níveis de vibração, aproximando-se assim dos níveis de conforto de referência estabelecidos para estes recintos.

Deste modo, e face ao exposto anteriormente, constata-se haver a necessidade de realizar nova campanha de ensaios aos degraus das bancadas do Estádio do Dragão, os quais estarão localizados em diferentes zonas do primeiro anel das bancadas, nomeadamente os degraus de bancada da bancada norte e sul.

Face ao exposto, o principal objetivo da presente dissertação passou pela avaliação experimental e numérica do comportamento dinâmico das bancadas do Estádio do Dragão, envolvendo a modelação numérica, caracterização das propriedades dinâmicas e a calibração experimental baseada em algoritmos genéticos.

Neste âmbito um dos objetivos específicos desta dissertação compreendeu a caracterização experimental do comportamento dinâmico das bancadas norte e sul do Estádio do Dragão através da realização de duas campanhas de ensaios dinâmicos e que visem a caracterização das propriedades dinâmicas em termo de frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento além da avaliação da sua variabilidade esperada. Foi ainda realizada uma inspeção visual dos degraus de bancada e realizado um ensaio de caracterização do betão com recurso à técnicas de ultra-sons.

Outro objetivo passou pelo desenvolvimento e aplicação de metodologias iterativas assentes em algoritmos genéticos para resolução de problemas de calibração de modelos numéricos de elementos finitos com base em informação modal experimental. Para o efeito será utilizada uma metodologia computacional inovadora que compreende a articulação entre três programas comerciais Autodesk ROBOT e MATLAB por aplicação de uma rotina Robot API numa folha de cálculo do Excel. O processo de calibração envolve a resolução de um problema de otimização que consiste na minimização de uma função objetivo que inclui os desvios das respostas numéricos e experimentais. Neste contexto surgiu necessidade de estudar técnicas automáticas de emparelhamento de modos de vibração, as quais são fundamentais para o sucesso do processo de otimização. Para verificação estabilidade do algoritmo foi ainda avaliada a robustez em relação a alguns operadores genéticos, em particular, os operadores de reprodução e seleção.

Após se ter enunciado os objetivos desta dissertação, nos parágrafos seguintes será realizada uma breve descrição dos seis capítulos que a constituem.

No Capítulo 1 é realizado um enquadramento da presente dissertação, fazendo-se também um levantamento de investigações realizadas no âmbito da avaliação do comportamento dinâmico de bancadas de estádios de futebol, a nível nacional e internacional. São também apresentados a motivação e os objetivos da dissertação bem como os capítulos que a constituem.

No Capítulo 2 são apresentados os aspetos gerais e os principais conceitos a considerar na avaliação do comportamento dinâmico de estruturas. São descritos os principais ensaios dinâmicos que usualmente são utilizados na caracterização das propriedades dinâmicas de estruturas de engenharia

civil. É também descrita técnica de identificação modal no domínio da frequência, nomeadamente, o método melhorado de decomposição no domínio da frequência (EFDD), que permitiu a identificação dos parâmetros modais experimentais dos degraus de bancada do Estádio do Dragão.

No Capítulo 3 são descritas as metodologias de calibração experimental de modelos de elementos finitos, dando-se especial ênfase às metodologias iterativas assentes em algoritmos de otimização. Neste contexto serão abordados os principais conceitos relativos à análise de sensibilidade, técnicas de emparelhamento de modos de vibração e a otimização. Por último, será apresentada a aplicação computacional iterativa que visa a calibração dos modelos numéricos baseados em algoritmos genéticos. A implementação computacional envolveu o recurso a três programas comerciais: Autodesk ROBOT (Autodesk, 2012), Office Excel (Microsoft, 2013) e MATLAB (MathWorks, 2016), por aplicação de um interface ROBOT API, o qual constitui uma aplicação inovadora desenvolvida no âmbito deste trabalho.

O Capítulo 4 comporta a caracterização experimental do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão. É realizada uma descrição geral do Estádio do Dragão, dando-se especial ênfase às bancadas e aos degraus de bancada. São descritos detalhadamente os ensaios dinâmicos que foram realizados em duas fases: a primeira fase permitiu a identificação dos parâmetros modais e a segunda fase envolveu a comparação dos parâmetros modais de diferentes degraus de bancada. Foi ainda realizada uma inspeção visual e realizado um ensaio de caracterização de betão com recurso à técnica de ultra-sons.

No Capítulo 5 é realizada a modelação numérica e a calibração experimental do modelo de elementos finitos dos degraus de bancada do Estádio do Dragão. Foi desenvolvido o modelo numérico apresentando-se para o efeito as propriedades geométricas e mecânicas consideradas bem como os resultados da análise modal. A calibração do modelo numérico compreendeu a realização de uma análise paramétrica preliminar para aferir a influência do número de degraus a considerar no modelo numérico. Foi realizada uma análise de sensibilidade global para identificação dos parâmetros numéricos mais sensíveis nas respostas modais dos degraus de bancada. O processo de otimização envolveu a aplicação de um algoritmo genético com recurso ao programa comercial MATLAB (MathWorks, 2016). Foi realizada uma análise de correlação entre os parâmetros modais experimentais e numéricos antes e após a calibração. Por último, foi realizada uma análise de sensibilidade a alguns dos operadores do algoritmo genético utilizado na calibração do modelo numérico para verificação da robustez do algoritmo.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, bem como perspectivas de desenvolvimentos futuros.

Por último, nos Anexos I e II apresentam-se dois artigos submetidos para publicação em congresso. O primeiro artigo foi publicado no congresso ECCOMAS 2016 (ver Anexo I), realizado de 5 a 10 de junho de 2016, na ilha de Creta, Grécia, cujo tema assentou nas metodologias computacionais utilizadas na Engenharia Civil. O segundo artigo foi submetido e aceite no congresso TEST&E 2016 (ver Anexo II), a realizar de 4 a 6 de julho de 2016, em Lisboa, Portugal, cujo tema assenta em ensaios de experimentação na Engenharia Civil.

2 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS DE ESTRUTURAS

2.1 INTRODUÇÃO

A avaliação experimental das características dinâmicas de estruturas tem vindo a ganhar relevo nas últimas décadas contribuindo para uma evolução na análise do comportamento das estruturas existentes sob ações dinâmicas, e que assumem especial relevo no caso de pontes, barragens e outro tipo de estruturas especiais como é o caso dos estádios de futebol.

A avaliação experimental das propriedades dinâmicas é geralmente realizada a partir das respostas às ações ambientais que normalmente atuam sobre as estruturas (tráfego, vento, sismos, etc.) por intermédio da aplicação de técnicas de identificação de sistemas, ou de identificação modal, no caso específico de estruturas. Estas técnicas permitem estimar os parâmetros modais, em particular as frequências de vibração, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento.

A identificação modal pode ser feita seguindo duas abordagens: a identificação modal clássica e a identificação modal estocástica.

A identificação modal clássica assenta na análise experimental com controlo e medição das forças aplicadas na estrutura. É portanto um método determinístico que pode ser realizado com ensaios de vibração forçada onde há um pleno conhecimento e controlo das forças aplicadas às estruturas e das respostas medidas.

No entanto, a maioria das estruturas de engenharia civil são de grandes dimensões, e com valores das frequências de vibração geralmente reduzidos, pelo que a sua excitação controlada implicaria a utilização de equipamentos de grandes dimensões e com custos elevados. Por outro lado certas estruturas, na maioria das vezes, a interrupção do seu normal funcionamento para a instalação dos equipamentos de excitação, nem sempre é possível de acontecer.

Assim, surge a necessidade de recorrer a técnicas de identificação modal baseadas em ensaios dinâmicos de vibração ambiente, nos quais se mede apenas as respostas da estrutura a ações decorrentes da normal utilização da estrutura, como por exemplo, as ações do vento, dos peões, entre outras. As técnicas de identificação modal associadas designam-se como estocásticas, para as quais as forças de excitação relativas às ações ambiente não são controladas nem medidas.

No presente Capítulo será apresentada a formulação teórica subjacente à avaliação dinâmica de estruturas no domínio da frequência que é a base para o entendimento das técnicas de identificação modal utilizadas no presente trabalho (Secção 2.2). Na Secção 2.3 serão abordadas as técnicas de ensaio utilizadas na realização de ensaios “*in-situ*” de caracterização dinâmica de estruturas de engenharia civil. Na secção 2.4 será descrita uma técnica de identificação modal estocástica no domínio da frequência, em particular a versão melhorada do método de decomposição no domínio da frequência (EFDD).

Importa ainda referir que os temas apresentados no presente capítulo estão bem documentados em bibliografia de referência, nomeadamente em Caetano (1992), Ewins (2000), Magalhães (2003) e Rodrigues (2004)

2.2 ASPETOS GERAIS

2.2.1 Sistemas de um grau de liberdade

O equilíbrio dinâmico do movimento de um sistema linear de com um grau de liberdade, de massa m , rigidez k e coeficiente de amortecimento viscoso c , é traduzido pela seguinte equação:

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = p(t) \quad (2.1)$$

em que $u(t)$ é a resposta a uma ação $p(t)$ e $\dot{u}(t)$ e $\ddot{u}(t)$ são a primeira e segunda derivadas de $u(t)$ em ordem ao tempo (Magalhães, 2003).

Aplicando uma transformada de Fourier a cada um dos membros da Equação, sabendo-se que a derivação no domínio do tempo se transforma no produto $i\omega$ no domínio da frequência, de transformação para o domínio da frequência resulta:

$$-m \omega^2 U(\omega) + c i \omega U(\omega) + k U(\omega) = P(\omega) \quad (2.2)$$

sendo $P(\omega)$ e $U(\omega)$ as transformadas de Fourier de $p(t)$ e $u(t)$, respetivamente.

Com a Equação (2.2) é possível obter, de forma explícita, a resposta no domínio da frequência conhecida a excitação:

$$U(\omega) = \frac{P(\omega)}{-\omega^2 m + i c \omega + k} = H(\omega) P(\omega) \quad (2.3)$$

em que $H(\omega)$ é denominada função de resposta em frequência (FRF) de um sistema de um grau de liberdade. Dividindo o numerador e denominador da Equação (2.3) por m , em que a frequência natural do sistema é representada por $\omega_1 = \sqrt{k/m}$, e usando a igualdade $c = 2\xi m \omega_1$, resulta que:

$$H(\omega) = \frac{1/m}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2 i \xi \omega \omega_1} \quad (2.4)$$

A FRF é uma função complexa, constituída por uma parte real (R) e por uma parte imaginária (I), a qual é definida por duas funções: a amplitude, $|H(\omega)| = \sqrt{R^2 + I^2}$, e a fase, $\phi(\omega) = \arctg(I/R)$. Da aplicação da Expressão (2.4) constata-se que a FRF atinge a sua amplitude máxima na proximidade da frequência de ressonância do sistema, correspondendo a uma mudança de fase de 180° (Figura 2.1). Assim, a partir da forma do gráfico é possível identificar o coeficiente de amortecimento da estrutura, ou seja, quando mais aguçado é a forma do gráfico, menor será o coeficiente de amortecimento (Magalhães, 2003).

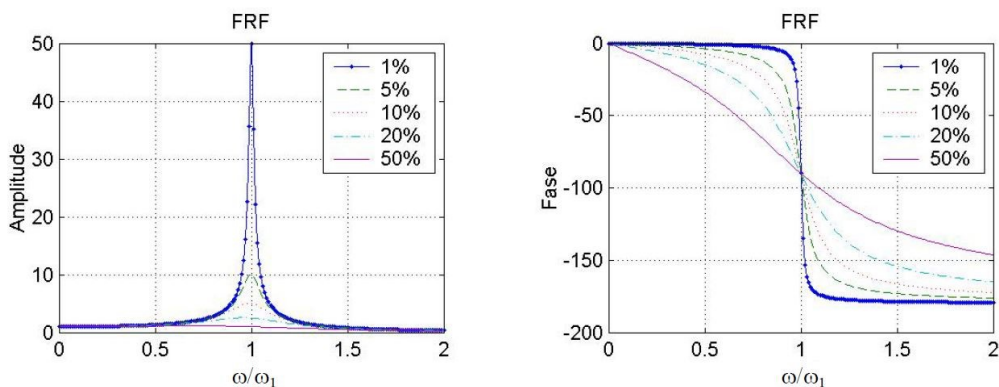


Figura 2.1 — Função de Respostas em Frequência: amplitude e fase (adaptado de Magalhães, 2003).

A função de resposta em frequência apresentada relaciona forças com deslocamentos (receptância). Contudo, multiplicando sucessivamente a Expressão (2.4) por $i\omega$, é possível relacionar as forças com as velocidades (mobilidade):

$$H(\omega) = \frac{1}{m} \cdot \frac{i \omega}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2 i \xi \omega \omega_1} \quad (2.5)$$

e relacionar as forças com acelerações (inertância):

$$H(\omega) = \frac{1}{m} \cdot \frac{-\omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega\omega_1} \quad (2.6)$$

2.2.2 Sistemas de múltiplos graus de liberdade

Um sistema com múltiplos graus de liberdade nas condições expressas para a Equação (2.1), é regido pelo sistema de equações matriciais, com dimensões $n \times n$:

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) = P(t) \quad (2.7)$$

em que, M_{ij} , C_{ij} e K_{ij} são os elementos das matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema.

Seguindo a sequência de passos análoga à utilizada para um sistema de um grau de liberdade, por aplicação da transformada de Fourier a ambos os membros da Expressão (2.7), obtém-se uma expressão que relaciona, no domínio da frequência, a resposta do sistema com a excitação:

$$U(\omega) = H(\omega) P(\omega) \quad (2.8)$$

em que $U(\omega)$ e $P(\omega)$ são vetores de dimensão $n \times 1$, que representam as transformadas de Fourier da resposta e da excitação. $H(\omega)$ é uma matriz de dimensão $n \times n$, em que cada componente genérica $H_{ij}(\omega)$ é uma função de resposta em frequência (FRF) do sistema, que relaciona a resposta no grau de liberdade i quando é aplicada uma força generalizada no grau de liberdade j .

A matriz $H(\omega)$ relaciona-se com as matrizes de massa (M), amortecimento (C) e rigidez (K) do sistema através da seguinte expressão:

$$H(\omega) = [-\omega^2 M + \omega i C + K]^{-1} \quad (2.9)$$

A aplicação da Expressão (2.9) obriga ao cálculo da inversa de uma matriz complexa para cada frequência em que se pretenda definir esta matriz, tornando-se um processo numericamente muito demorado.

Um sistema de $n \times n$ equações diferenciais do movimento pode ser transformado num conjunto de $n \times 1$ equações diferenciais por aplicação da formulação modal, o qual é conseguido organizando os modos de vibração do sistema (φ_k), numa matriz Φ , designada por matriz modal, e que contém nas suas colunas os modos de vibração.

A matriz das funções de resposta em frequências completa pode ser definida a partir das funções de resposta em frequência no espaço modal, encontrando-se os modos de vibração normalizados em relação à matriz de massa, sendo expressa pela seguinte expressão:

$$H_{(i,j)}(\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{(\varphi_i)_k (\varphi_j)_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + 2i \xi_k \omega \omega_k} \quad (2.10)$$

em que $(\varphi_i)_k$ é a componente i do modo de vibração k , $(\varphi_j)_k$ é a componente j do modo de vibração k , ω_k é a frequência angular do modo de vibração k , ω é a frequência angular da excitação, e ξ_k é o coeficiente de amortecimento do modo de vibração k .

A Expressão (2.10) representa a função de resposta em frequência que relaciona o deslocamento no grau de liberdade i com a força aplicada no grau de liberdade j , designada por receptância. A mesma expressão agora em termos de acelerações, denominada de inertância, resulta:

$$H_{(i,j)}(\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{-\omega^2 (\varphi_i)_k (\varphi_j)_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + 2i \xi_k \omega \omega_k} \quad (2.11)$$

Nas Figura 2.2 e Figura 2.3 apresentam-se os gráficos das amplitudes e fases das matrizes de função de resposta, respetivamente, calculados para uma estrutura com três graus de liberdade, onde foi feita apenas a análise plana do modelo, considerando a direção mais flexível do pórtico tridimensional. Foi admitido um coeficiente de amortecimento de 1 % e 5%. Para o traçado dos gráficos, as funções de resposta em frequência foram avaliadas para 1500 pontos, sendo portanto necessário calcular a inversa de 1500 matrizes.

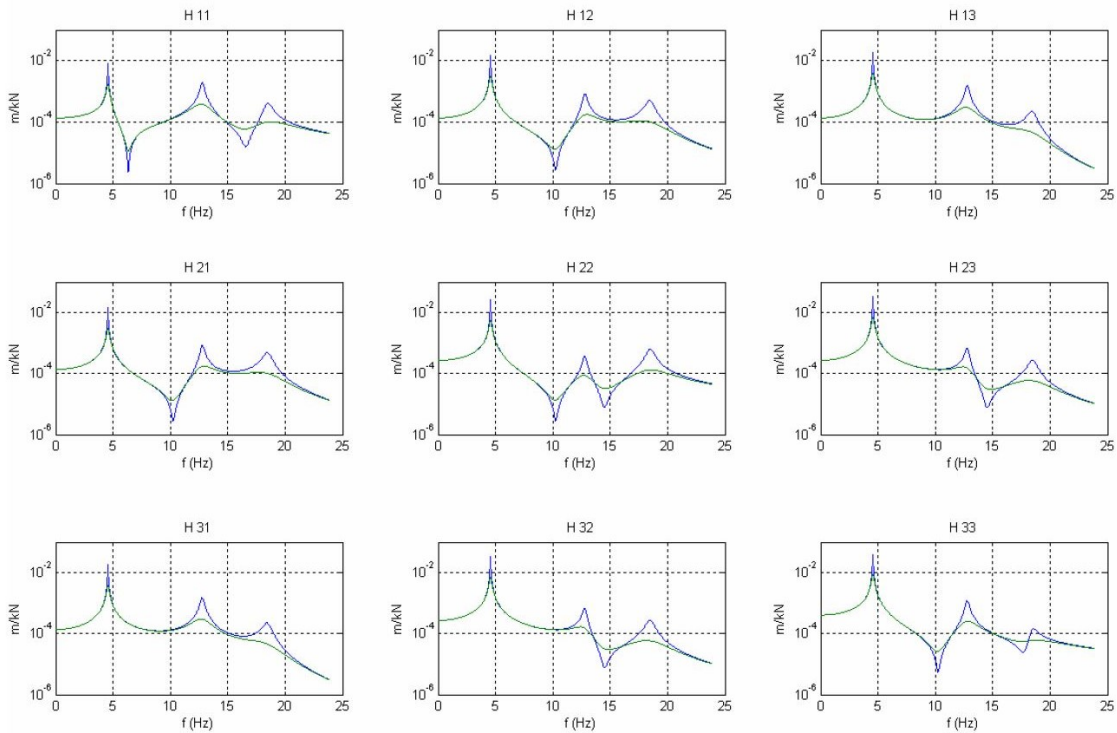


Figura 2.2 — Matriz da amplitude das funções de resposta em frequência para dois valores de amortecimento, $\xi=1\%$ (azul) e $\xi=5\%$ (verde) (adaptado de Magalhães, 2003).

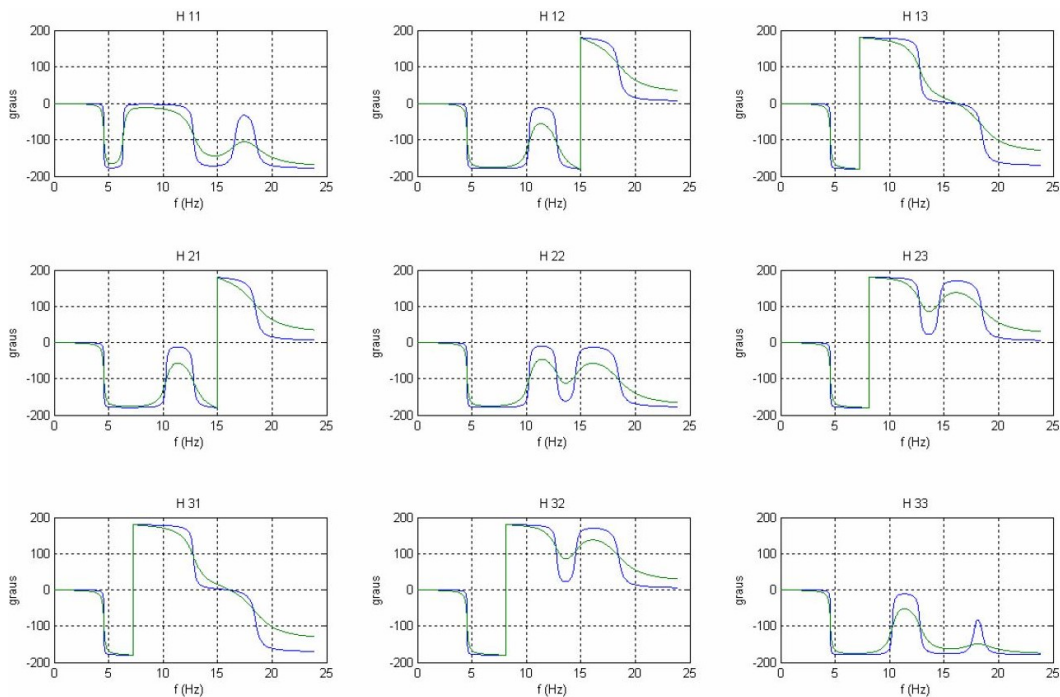


Figura 2.3 — Matriz da fase das funções de resposta em frequência para dois valores de amortecimento, $\xi=1\%$ (azul) e $\xi=5\%$ (verde) (adaptado de Magalhães, 2003).

A análise dos gráficos permite identificar algumas das características dinâmicas do sistema, dos quais se destaca a identificação das frequências naturais que correspondem aos picos das amplitudes (Figura 2.2) e correspondentes a uma mudança de fase de 180° (Figura 2.3). Outra característica observada, relacionada com a forma dos picos, tem a ver com o coeficiente de amortecimento de cada um dos modos. Assim observa-se que o coeficiente de amortecimento do terceiro modo é superior ao coeficiente de amortecimento do segundo modo e, por sua vez, o do segundo modo é superior ao do primeiro modo.

No âmbito da excitação estocástica, a excitação é aleatória e a sua caracterização é realizada com base em conceitos probabilísticos. De modo a simplificar o processo matemático dos processos estocásticos, assume-se que estes são estacionários e ergódicos, ou seja, nos processos estacionários as suas características estatísticas são independentes no instante temporal, no caso dos processos ergódicos o valor dos parâmetros estatísticos avaliados tendo em conta as diferentes realizações, para um determinado instante de tempo, é igual ao dos mesmos parâmetros estatísticos avaliados numa realização ao longo do tempo (Magalhães, 2003).

Importa referir que na aplicação dos métodos de identificação modal, baseados na medição da resposta em ensaios de vibração ambiental, assume-se que a excitação tem propriedades de um ruído branco. O ruído branco manifesta-se quando o sinal medido recebe a contribuição de todas as frequências, e é representado por um espectro de área infinita e a sua função de auto-correlação com uma ordenada de valor infinito na origem, e ordenadas nulas nas restantes abcissas.

No âmbito da identificação modal estocástica, os espectros da resposta e da excitação são relacionados usando a função de resposta em frequência. No caso de excitação com ruído branco, e para o caso de sistema com um grau de liberdade, aplica-se a seguinte equação:

$$S_{qq}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{pp}(\omega) \quad (2.12)$$

em que $S_{qq}(\omega)$ é a matriz dos auto-espectros da resposta da estrutura, $H(\omega)$ é a matriz das funções de resposta em frequência, e $S_{pp}(\omega)$ é a matriz dos auto-espectros da excitação da estrutura.

A aplicação da Equação (2.12) apenas permite identificar a amplitude da função de resposta em frequência. No entanto, como o espectro de potência da resposta é proporcional ao quadrado da amplitude da função de resposta em frequência, é possível a partir da sua aplicação, identificar as características dinâmicas da estrutura.

Em sistema de múltiplos graus de liberdade, a Equação (2.12), considerando que a excitação atuante numa estrutura tem características de ruído branco nos diferentes graus de liberdade, pode transformar-se na seguinte equação:

$$S_q(\omega) = H(\omega) R_p H^H(\omega) \quad (2.13)$$

em que $S_{qq}(\omega)$ é a matriz dos espectros da resposta da estrutura e R_p é uma matriz das correlações, e $H^H(\omega)$ é a transposta conjugada da matriz das funções de resposta em frequência.

No caso em que os sinais, além de serem ruídos brancos, forem estritamente independentes entre si, as correlações são nulas e a matriz R_p é uma matriz diagonal. Nestas circunstâncias a matriz dos espectros de resposta da estrutura poderá ser calculada considerando a contribuição de cada modo de vibração k , para qualquer elemento (linha i e da coluna j), considerando a seguinte equação:

$$S_{q(i,j)}^k(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{(\varphi_i)_k (\varphi_r)_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + 2i \xi_k \omega \omega_k} R_{prr} \frac{(\varphi_j)_k (\varphi_r)_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + 2i \xi_k \omega \omega_k} \quad (2.14)$$

2.3 ENSAIOS *IN SITU* DE CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS

Na presente secção serão abordados três tipos de ensaios que normalmente são utilizados na caracterização dinâmica de estruturas: os ensaios de vibração forçada, os ensaios em vibração livre, e os ensaios de vibração ambiental.

Os ensaios de vibração forçada a medição envolve a aplicação de uma excitação controlada à estrutura e a medição da sua resposta, normalmente em acelerações.

No caso dos ensaios em vibração livre é imposto à estrutura um deslocamento inicial que é repentinamente libertado, deixando a estrutura vibrar em regime livre. No caso dos ensaios em vibração ambiental as estruturas são sujeitas às ações ambientais que normalmente atuam sobre elas, tais como o vento, peões, micro-sismos, etc.

2.3.1 Ensaios de vibração forçada

Os ensaios de vibração forçada consistem na aplicação de uma excitação controlada num ponto ou em vários pontos da estrutura perfeitamente identificados, e na medição da resposta da estrutura, normalmente em termos de acelerações. Esta técnica de ensaio envolve a medição das forças de excitação e, por isso, permite obter as funções de resposta em frequência (FRF), as quais relacionam

as respostas medidas nos diversos pontos com as forças aplicadas, permitindo assim a caracterização das propriedades dinâmicas da estrutura.

Na realização deste tipo de ensaio a dimensão da estrutura condiciona a escolha dos equipamentos adequado para a aplicação das forças de excitação. Os equipamentos são geralmente excitadores servo-hidráulicos (Figura 2.4a), e mecânicos de massas excêntricas (Figura 2.4b), ou ainda equipamentos de aplicação de impulsos tais como martelos de impacto e a queda controlada de massas. Por outro lado as forças a aplicar podem ser de vários tipos, como por exemplo, do tipo harmónico, com características de ruído branco numa determinada gama de frequências, ou ainda do tipo impulsivo.



a)



b)

Figura 2.4 — Ensaio de vibração forçada (adaptado de Rodrigues, 2004): a) excitador servo-hidráulico utilizado no EMPA; b) excitador de massas utilizado no Departamento de Barragens do LNEC.

Para estruturas pequenas, existem diversos equipamentos para aplicação de forças excitação, os quais são disponibilizados por diversos fabricantes (IndiaMART; Thermotron; UNHOLTZ-DICKIE CORPORATION, etc.). No entanto, para estruturas de grandes dimensões, este tipo de ensaio torna-se de aplicação difícil e com custos elevados, associados à montagem e transporte, e exigindo geralmente equipamentos elétricos de elevada potência para o funcionamento dos dispositivos de atuação. Poderá originar ainda a interrupção da normal utilização das estruturas, como é o caso da interrupção do tráfego em pontes.

O recurso a ensaios de vibração forçada é bastante útil em barragens, as quais, devido à sua dimensão, torna impraticável o recurso a ensaios de vibração ambiental onde a baixa amplitude das respostas é insuficiente para a correta caracterização das propriedades dinâmicas da estrutura.

2.3.2 Ensaios em vibração livre

Os ensaios em vibração livre consistem na imposição de um deslocamento à estrutura libertando-a, em seguida, de forma brusca, impondo na estrutura um regime de vibração livre. É um ensaio que é normalmente utilizado para identificar os coeficientes de amortecimento das estruturas, no entanto, permite também identificar as restantes características dinâmicas da estrutura, como é o caso das frequências naturais e os modos de vibração.

A realização deste tipo de ensaios pode envolver a ancoragem da estrutura, através de cabos, a uma estrutura vizinha suficientemente rígida, ou ser puxada por uma grua, ou mesmo ancorar à estrutura uma carga suspensa, através de cabos, procedendo-se ao seu corte de forma repentina.

A título de exemplo, na Figura 2.5, apresenta-se um ensaio em vibração livre realizado na estrutura de ampliação do Aeroporto João Paulo II, na Madeira, o qual consistiu na suspensão de uma carga de 62 toneladas (Figura 2.5a), e um outro ensaio realizado na Ponte Vasco da Gama, consistindo na suspensão de uma barcaça de 60 toneladas (Figura 2.5b). Nos dois casos a carga foi suspensa na estrutura com recurso a cabos de aço. Na Figura 2.5c) apresenta-se a estimativa do coeficiente de amortecimento do 1º modo de torção da Ponte Vasco da Gama.

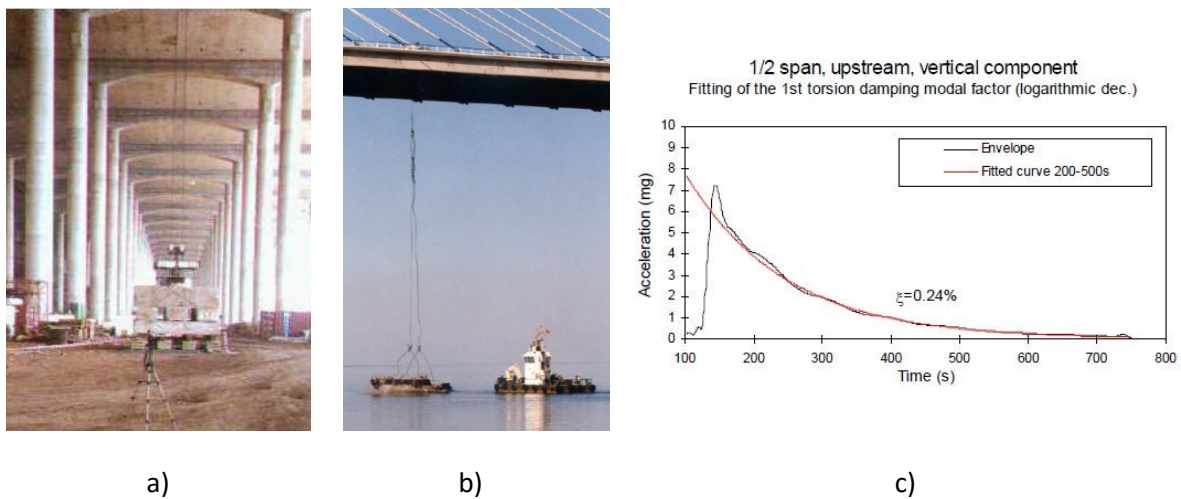


Figura 2.5 — Ensaios de vibração livre (Rodrigues, 2004): a) estrutura de ampliação do Aeroporto João Paulo II, na Madeira; b) Ponte Vasco da Gama; c) gráfico do coeficiente de amortecimento do 1º modo de torção da Ponte Vasco da Gama (Caetano *et al.*, 2010).

Este tipo de ensaio também apresenta alguns inconvenientes, destacando-se a operação que envolve o corte do cabo que exige condições de segurança apertadas.

Importa ainda referir que o interesse deste tipo de ensaio surge quando se pretende avaliar coeficientes de amortecimento de uma forma mais precisa, uma vez que, devido aos reduzidos valores de vibração que geralmente ocorrem nos ensaios ambientais, torna-se difícil efetuar essa avaliação (Rodrigues, 2004).

2.3.3 Ensaios de medição de respostas às ações ambiente

Nos ensaios de vibração ambiental, a medição da resposta das estruturas é realizada sob ação das ações do vento, peões, micro-sismos, entre outros.

Comparativamente aos restantes ensaios dinâmicos são de implementação mais simples, e podem ser realizados sem que haja qualquer interrupção no normal funcionamento das estruturas, tornando-o um ensaio com uma aplicabilidade crescente nas estruturas de engenharia civil.

Com estes ensaios é possível identificar modos de vibração com frequências muito baixas (abaixo de 1 Hz), facto este que está relacionado com a elevada sensibilidade dos transdutores utilizados.

A realização destes ensaios consiste tipicamente na medição das acelerações em vários pontos da estrutura durante um determinado intervalo de tempo sob as ações ambientais às quais as estruturas estão expostas. Na Figura 2.6 apresentam-se o plano de ensaios e alguns pormenores dos alinhamentos utilizados no ensaio de vibração ambiental da Ponte Ferroviária de São Lourenço, localizada na linha norte da REFER.

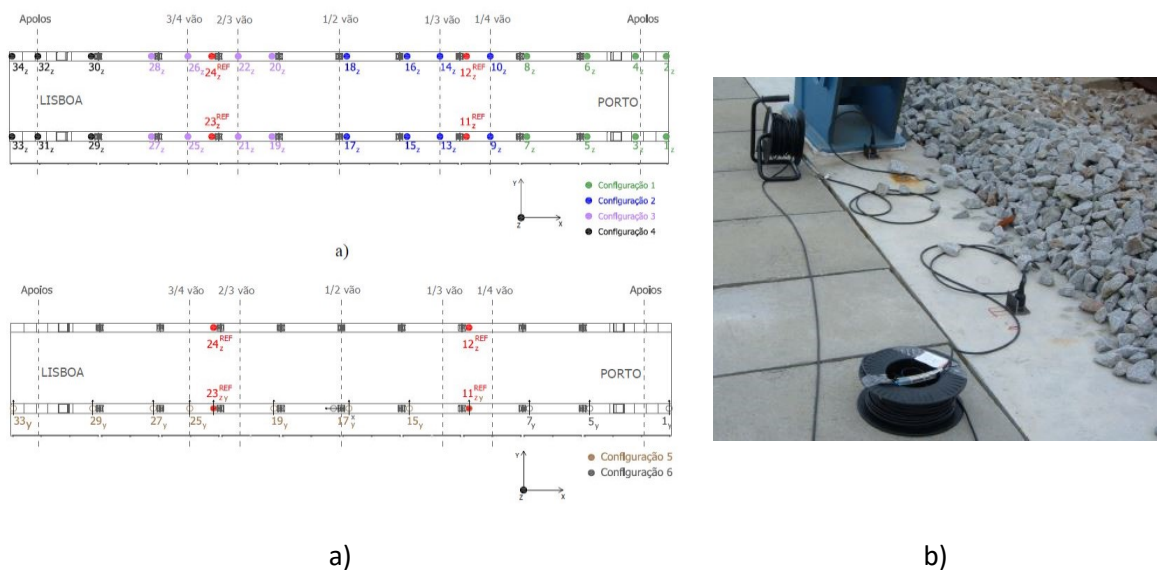


Figura 2.6 — Ensaios de medição das respostas às ações ambiente da Ponte São Lourenço (Ribeiro, 2012): a) plano de ensaios; b) pormenor dos alinhamentos dos acelerómetros.

O sucesso dos ensaios de vibração ambiental, à semelhança dos ensaios apresentados na secção 2.3.1 e 2.3.2, depende de um conjunto de procedimentos a tomar ao nível do planeamento, preparação e execução dos trabalhos, salientando-se os seguintes aspetos (Rodrigues, 2004): i) realização de uma visita preliminar à estrutura para a verificação das condições existentes no local e a preparação da campanha de ensaios; ii) desenvolvimento de modelo numérico de elementos finitos da estrutura com base nos parâmetros geométricos e mecânicos disponibilizados pelo projeto, e que permita obter desde logo uma estimativa dos valores das frequências e modos de vibração; iv) identificação dos pontos de medição, com base no modelo numérico desenvolvido e ajustadas às características da estrutura; v) planeamento detalhado do ensaio que contemple a distribuição dos transdutores, e a distribuição dos cabos coaxiais.

Quando há a necessidade de proceder à identificação de configurações modais, é de grande importância medir as respostas das estruturas num número suficiente de pontos que permitam a identificação dessas configurações de forma clara e precisa. Por outro lado, a escolha dos pontos de medição, deve ser realizada de modo a possibilitar a identificação do maior número de modos de vibração. A seleção dos pontos de medição deverá ser realizada com base no modelo numérico desenvolvido.

Normalmente o número de pontos de medição selecionados é francamente superior ao número de transdutores disponíveis, o que obriga à realização de várias configurações de medição (ou setups) nas quais são identificados pontos fixos, ou seja, pontos de referência, onde são colocados os transdutores que se mantêm no mesmo local e pontos móveis. A seleção dos pontos de referência deve ser criteriosa, e devem-se evitar os nodos dos modos de vibração que se pretende identificar, ou seja, os pontos de ordenada modal nula.

Esta técnica de ensaios é designada por técnica de pontos de referência fixos (Rodrigues, 2004), e envolve geralmente a realização das medições com várias configurações de medição. Em cada uma das configurações de medição são identificados um conjunto de pontos de referência comuns a todas as configurações. Adicionalmente existem transdutores que vão percorrendo os restantes pontos de medição (pontos móveis). Os pontos de referência têm por função correlacionar a resposta entre os pontos de medição móveis das diferentes configurações de medição. Na Figura 2.7 ilustra-se a aplicação da técnica dos pontos de referência fixos ao caso de uma viga de dois tramos (com um e dois pontos de referência).

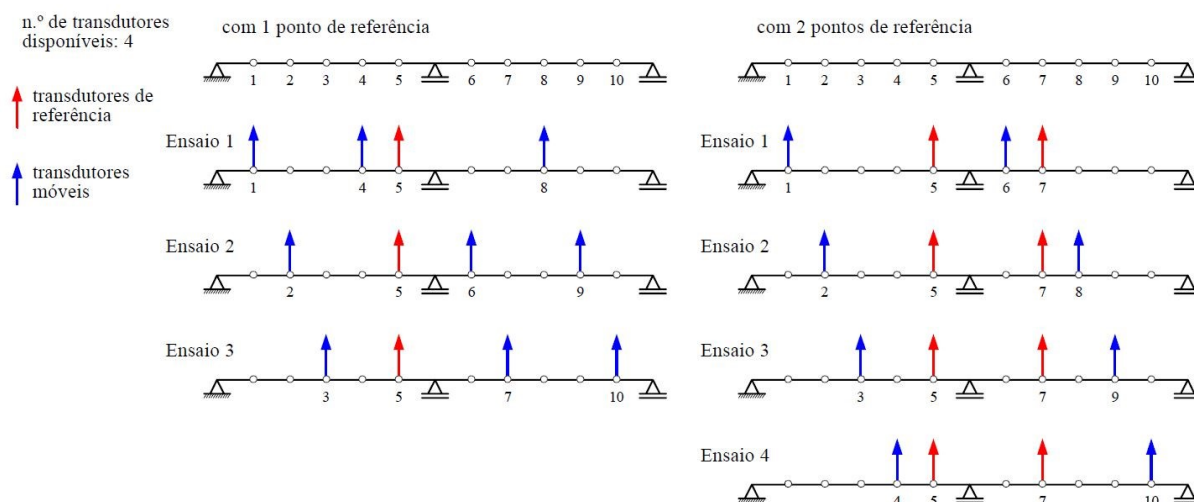


Figura 2.7 — Técnica de ensaio com pontos de referência fixos (adaptado de Rodrigues, 2004).

Ao nível dos registos de acelerações medidas importa ter em atenção a sua qualidade, em particular evitar: saturação do sinal, baixa relação sinal/ruído, ruído intermitente, influência da frequência da rede de distribuição de energia elétrica, tendências espúrias, perdas de sinal, ponto singulares.

O pré-processamento de informação medida deverá ainda envolver as seguintes operações de processamento básico de sinal: correção de pontos singulares, junção de amostras por aplicação de janelas temporais de transição, introdução de fatores de escala nos registos, eventuais correções dos registos tendo em conta a resposta em frequência dos equipamentos utilizados, remoção da média e de tendências lineares por aplicação de filtros digitais passa-alto, e a eventual decimação dos sinais. Estas especificidades poderão ser vistas com maior detalhe no trabalho desenvolvido por Rodrigues (2004).

2.4 IDENTIFICAÇÃO MODAL ESTOCÁSTICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Conforme referido na Secção 2.1 as forças de excitação devidas às ações ambientais não são medidas, o que implica que na identificação modal se assuma que estas ações seguem um processo estocástico gaussiano de tipo ruído branco e com média nula. Na Figura 2.8 ilustra-se esquematicamente o conceito que está na base dos métodos de identificação modal estocásticos (Rodrigues, 2004), e que é assemelhável à resposta de um sistema virtual excitado por um processo do tipo ruído branco.

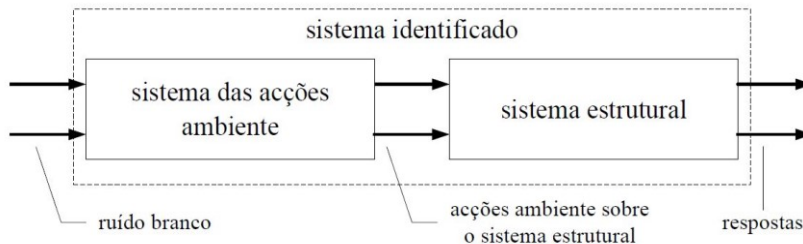


Figura 2.8 — Métodos de identificação modal estocásticos (adaptado de Rodrigues, 2004).

Um dos aspetos relevantes na aplicação de métodos de identificação modal estocástica prende-se com o facto das características dinâmicas do sistema estiver tipicamente relacionados com os picos da amplitude das funções de densidade espectral das respostas. No entanto quando os sistemas estruturais apresentam picos muito próximos ou amortecimentos com valores muito altos, torna-se muito difícil a identificação das suas características dinâmicas por aplicação de métodos de identificação modal estocástica.

Atualmente existem várias técnicas de identificação modal estocástica no domínio da frequência que permitem obter uma estimativa bastante aproximada dos parâmetros dinâmicos caracterizadores dos sistemas, nomeadamente, as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento.

Na Figura 2.9 esquematizados os métodos de identificação modal estocástica mais utilizados na área da engenharia civil.

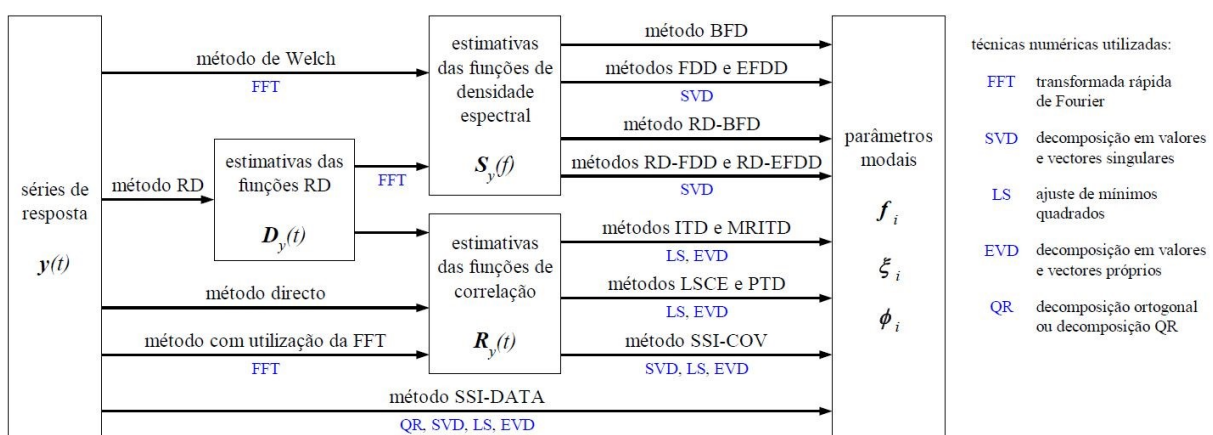


Figura 2.9 — Principais métodos de identificação modal estocástica (adaptado de Rodrigues, 2004).

Os métodos de identificação modal estocástica no domínio do tempo e da frequência (Rodrigues, 2004) são baseados em cinco técnicas numéricas de processamento da informação experimental: a transformada rápida de Fourier (FFT), a decomposição em valores e vetores singulares (SVD), o ajuste

dos mínimos quadrados (LS), a decomposição em valores e vetores próprios (EVD) e decomposição QR.

A explicação detalhada dos diversos métodos de identificação modal estocástica, está disponível em bibliografia de referência como, Caetano (1992), Magalhães (2003) e Rodrigues (2004).

2.4.1 Método melhorado da decomposição no domínio da frequência - EFDD

No âmbito do presente trabalho, o método escolhido para a identificação modal foi a versão melhorada do método de decomposição no domínio da frequência (EFDD – *Enhanced Frequency Domain Decomposition*).

O método EFDD corresponde a uma versão melhorada do método FDD, tendo sido desenvolvido por Brincker *et al.* (2001).

A aplicação destes dois métodos, FDD e EFDD, permitiram resolver duas importantes limitações que existiam nos métodos anteriormente desenvolvidos, como é o caso do método de seleção de picos (PP – “Peak-Picking”): i) possibilitam a identificação de modos com frequências muito próximas; ii) no caso particular do método EFDD, permite a obtenção de boas estimativas dos coeficientes de amortecimento modais.

A utilização do programa comercial ARTEMIS (SVS, 2011), permite a decomposição dos valores singulares (SVD – “*Singular Value Decomposition*”) da matriz de espectros de resposta da estrutura de uma forma bastante automática. Esta decomposição conduz à obtenção das funções densidade espectral de potência de sistemas de 1 grau de liberdade, que têm as mesmas frequências naturais e os mesmos coeficientes de amortecimento dos modos de vibração da estrutura.

A aplicação do método EFDD, envolve: i) a avaliação das funções densidade espectral da resposta, ii) a decomposição em valores e vetores singulares da matriz de funções de densidade espectral, e iii) a análise dos picos da curva dos valores singulares, tendo em vista a identificação das frequências de vibração e correspondentes valores singulares, para a identificação dos modos de vibração (Rodrigues, 2004).

2.4.1.1 Identificação das frequências naturais e dos modos de vibração

No método EFDD é admitido que a excitação é do tipo ruído branco, o amortecimento da estrutura é reduzido e que os modos de vibração próximos são ortogonais entre si.

Considerando que as forças de excitação do sistema seguem um processo estocástico gaussiano com média nula e densidade espectral constante, a matriz de densidade espectral da resposta $S_y(\omega)$, avaliada numa frequência angular ω , é representada pela seguinte equação:

$$S_y(\omega) = U_c(\omega) S_c U_c^H(\omega) \quad (2.15)$$

em que:

S_c é uma matriz cuja diagonal compreende os l valores singulares dos espectros de resposta da estrutura. l representa o número de pontos instrumentados e a dimensão da matriz S_c ;

U_c é a matriz das funções de resposta em frequência;

U_c^H corresponde à matriz transposta e conjugada da matriz U_c .

Os valores singulares da matriz S_c , coincidem na frequência angular ω , com as ordenadas dos auto-espectros de sistemas de 1 grau de liberdade, em correspondência com cada um dos modos de vibração da estrutura.

A matriz U_c reúne, por ordem decrescente dos valores singulares, e em função da frequência, a ordenada do auto-espectro do oscilador de um grau de liberdade referente ao modo de vibração dominante nessa frequência (Magalhães, 2003).

Outro melhoramento introduzido pelo método EFDD traduz-se no facto da função de auto-correlação da resposta de um sistema de 1 grau de liberdade sujeito a uma excitação do tipo ruído branco ser proporcional à sua resposta em vibração livre (Brincker *et al.*, 2001).

As funções de auto-correlação, associadas a cada modo de vibração, podem ser obtidas com base na transformada para o domínio do tempo, por aplicação da FFT inversa, dos auto-espectros dos sistemas de um grau de liberdade. Deste modo é possível identificar os coeficientes de amortecimento e as frequências dos sistemas de um grau de liberdade, pois as funções dos auto-espectros são proporcionais às respostas em vibração livre.

Assim, a partir da função da auto-correlação, o valor das frequências é estimado a partir de uma regressão linear nos instantes de passagem por zero e nos instantes correspondentes aos valores máximos (positivos ou negativos), e tendo em conta a relação entre as frequências naturais amortecidas do sistema (ω_{ka}) e as frequências naturais não amortecidas (ω_k):

$$\omega_k = \frac{\omega_{ka}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.16)$$

Conforme se pode verificar, a Equação (2.16) pressupõe a determinação do coeficiente de amortecimento calculado por aplicação do método do decréscimo logarítmico, conforme apresentado na Secção 2.4.1.2.

Importa ainda referir que a escolha dos pontos na vizinhança da frequência de ressonância, para o cálculo da FFT inversa, pode ser realizado através da configuração modal, ou seja, por intermédio da comparação entre os vetores singulares associados a cada ponto candidato, com os vetores singulares associados à frequência de ressonância. A comparação entre os vetores é geralmente realizada por intermédio do parâmetro MAC.

2.4.1.2 Identificação dos coeficientes de amortecimento

Os coeficientes de amortecimento são determinados a partir das funções de auto-correlação, por transformação dos auto-espectros dos sistemas de um grau de liberdade para o domínio do tempo, através da inversa da transformada discreta de Fourier (IFFT). Assim, identificados os máximos e mínimos das funções de auto-correlação, o coeficiente de amortecimento (ξ) é determinado através do decaimento logarítmico (δ), por aplicação da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{R_n}{R_{n+m}} = \frac{\ln(R_n) - \ln(R_{n+m})}{m} \quad (2.17)$$

onde que R_n e R_{n+m} são dois valores extremos, da função de auto-correlação, afastados entre si de m ciclos.

O valor do coeficiente de amortecimento (ξ) poderá ser calculado a partir do valor do decaimento logarítmico (δ), recorrendo à seguinte relação:

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (2.18)$$

No caso de sistemas com amortecimento perfeitamente viscoso, o valor do coeficiente de amortecimento não depende da amplitude do movimento e, portanto, poderá ser aplicada a seguinte expressão a um qualquer par de extremos relativos:

$$\delta = \frac{\frac{1}{m} \ln \frac{R_n}{R_{n+m}}}{\sqrt{4 \pi^2 + \frac{1}{m} \ln \frac{R_n}{R_{n+m}}}} \approx \frac{\ln \frac{R_n}{R_{n+m}}}{2 \pi m} \quad (2.19)$$

3 METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS NUMÉRICOS DE ELEMENTOS FINITOS

3.1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas informáticos associados ao aumento da sua capacidade computacional (armazenamento, memória RAM e processadores mais rápidos), permitiu aos engenheiros de estruturas uma análise mais eficiente de estruturas novas ou existentes, sobretudo recorrendo a modelos numéricos mais complexos e baseados no método dos elementos finitos.

O desenvolvimento de um modelo numérico que simule a estrutura real é uma tarefa que envolve um conjunto de pressupostos e simplificações que são assumidos no processo de conceção do modelo. Na maioria das vezes as características consideradas no modelo numérico, não coincidem com as características reais da estrutura, devido sobretudo a incertezas na geometria das secções, variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais, condições de apoio, e também à incerteza associada às ações impostas à estrutura. Neste contexto, é facilmente compreensível o crescente interesse por parte da comunidade científica no desenvolvimento de técnicas que permitam a calibração automática de modelos numéricos com base em informação experimental.

A informação experimental é obtida de medições realizadas na estrutura baseadas em ensaios dinâmicos, nomeadamente, ensaios de vibração ambiental, ensaios de vibração livre e ensaios de vibração forçada, conforme detalhado no Capítulo 2. Estes ensaios são utilizados na recolha de informação modal, em particular as frequências, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento.

A informação modal experimental pode ser influenciada por erros de medição relacionados com as condições climatéricas as quais podem apresentar variabilidade (como o caso da temperatura e do

vento), alteração das condições de utilização da estrutura durante as medições, e ainda erros associados ao sistema de aquisição e processamento de sinais medidos (Zabel e Brehm, 2009).

A calibração experimental é uma técnica que consiste na alteração de alguns parâmetros do modelo numérico inicial, tendo em vista a minimização das diferenças entre os resultados numéricos e experimentais (Friswell e Mottershead, 1995). Pode ser realizada de forma manual, com base na sensibilidade estrutural do engenheiro, ou de forma automática, baseado em algoritmos matemáticos que permitem o ajuste entre os parâmetros numéricos e experimentais de forma mais eficiente e otimizada.

Para a calibração de modelos numéricos baseada em parâmetros modais existem essencialmente duas metodologias: a direta (Friswell e Mottershead, 1995; Yang e Chen, 2009) e a indireta ou iterativa (Zong *et al.*, 2005). A metodologia direta baseia-se na modificação direta dos termos das matrizes de massa e rigidez, numa única iteração, e a metodologia indireta ou iterativa está tipicamente relacionada com a minimização de uma função objetivo através de iterações sucessivas.

A Figura 3.1 ilustra o fluxograma de uma metodologia de calibração do modelo numérico de elementos finitos baseado nos parâmetros modais da estrutura (frequências naturais e modos de vibração), que recorre a um método iterativo baseado em um algoritmo de otimização.

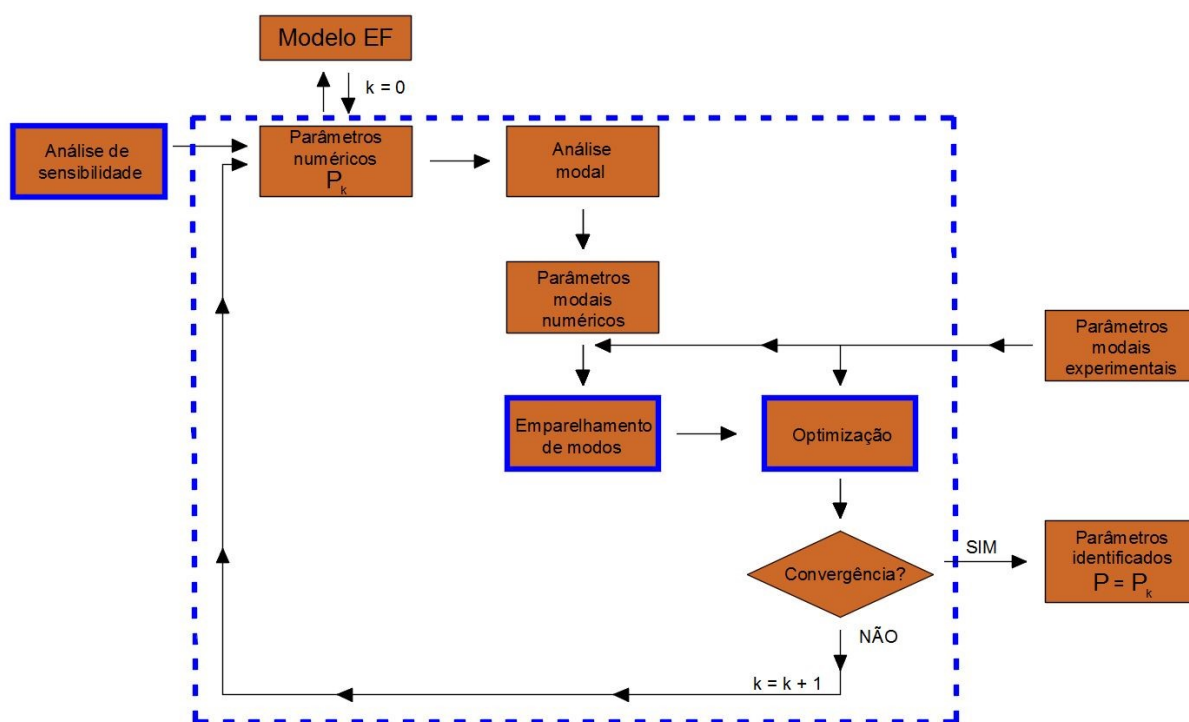


Figura 3.1 — Método iterativo baseado em algoritmos de otimização (adaptado de Ribeiro, 2012).

O modelo de elementos finitos é desenvolvido tendo por base um conjunto inicial de valores de parâmetros numéricos. É realizada uma análise de sensibilidade para selecionar os parâmetros que entram na calibração do modelo numérico. É realizada uma análise modal com o objetivo de obter os parâmetros modais numéricos e efetuado o emparelhamento dos modos de vibração numéricos e experimentais. Com base na aplicação de um algoritmo de otimização é estimado um novo conjunto de parâmetros tendo em vista a minimização do resíduo de uma função objetivo. O processo é repetido iterativamente até ser cumprido um critério de convergência.

No presente capítulo será abordada de uma forma mais detalhada a metodologia de calibração de modelos numéricos baseados em algoritmos de otimização. Para o efeito serão abordados as principais fases de implementação de metodologias de calibração identificadas a azul no fluxograma da Figura 3.1. Na secção 3.2 será abordada a análise de sensibilidade a qual permite selecionar os parâmetros a incluir na fase de otimização. Na secção 3.3 serão descritas as técnicas de emparelhamento de modos de vibração utilizadas no processo de calibração, salientando-se a sua importância na estabilidade e convergência do processo de otimização. No que se refere à otimização (secção 3.4) serão descritos as particularidades da aplicação do algoritmo genético a problemas de otimização, os principais operadores genéticos, o tratamento das restrições e as estratégias de otimização. Por último, na

secção 3.5 será descrita uma implementação computacional inovadora do método iterativo desenvolvida no âmbito do presente trabalho e que recorre a uma articulação eficiente entre diversos programas comerciais.

3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A identificação dos parâmetros que influenciam as respostas e a sua seleção para o processo de calibração do modelo numérico está muitas vezes relacionada com a complexidade do modelo. Geralmente quanto maior o número de parâmetros numéricos selecionados para o processo de calibração, menor será o tempo requerido e a dificuldade na procura da solução ótima. Acresce que apenas os parâmetros mais sensíveis à variação das respostas da estrutura poderão ser estimados com a precisão adequada.

Com o objetivo de selecionar os parâmetros numéricos que mais influenciam as respostas de uma estrutura, surgem as análises de sensibilidade, distinguindo-se dois tipos de análise: a análise de sensibilidade local e a análise de sensibilidade global.

A análise de sensibilidade local envolve a variação dos valores de cada um dos parâmetros de forma isolada e o cálculo da primeira derivada de cada resposta em relação a cada parâmetro. Por outro lado a análise de sensibilidade global faz variar os valores de todos os parâmetros em simultâneo, permitindo, numa única tentativa, obter as sensibilidades entre os parâmetros e as respostas a partir de um conjunto de amostras geradas por aplicação de uma técnica de amostragem.

As técnicas de amostragem permitem a geração aleatória de um conjunto de indivíduos, em que cada um dos indivíduos é constituído por um conjunto de parâmetros do modelo numérico. As técnicas de amostragem subdividem-se em dois grupos: as estocásticas e as sistemáticas.

As técnicas mais utilizadas são as estocásticas, em particular a baseada no método de Monte Carlo e do Hipercubo Latino. No método do Hipercubo Latino o espaço amostral de cada parâmetro é dividido em intervalos com a mesma probabilidade de ocorrência. Este método garante que a escolha de cada um dos intervalos é feita de forma aleatória, restringindo a geração de amostras de cada intervalo a uma única vez. Na Figura 3.2, ilustra-se a geração dos parâmetros X_1 e X_2 , por aplicação do método de Monte Carlo (Figura 3.2a) e do Hipercubo Latino (Figura 3.2b). O método do Hipercubo Latino

garante um melhor preenchimento do espaço amostral, com base no mesmo número de amostras, comparativamente ao método de Monte Carlo (Brehm *et al*, 2009).

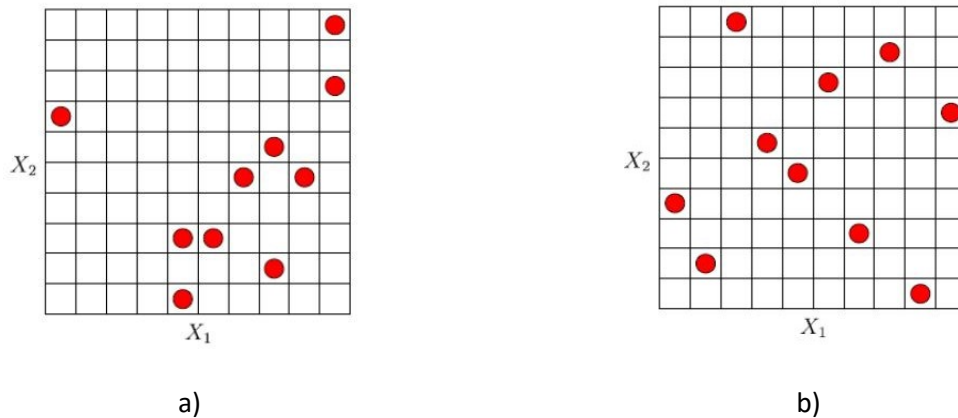


Figura 3.2 — Técnicas de amostragem estocástica (adaptado de Ribeiro, 2012): a) método de Monte Carlo; b) método do Hipercubo Latino.

Will *et al.* (2004) recomenda que o número mínimo de amostras geradas para o método do Hipercubo Latino é dado pelo seguinte expressão:

$$N = 2 \times (n_p + n_R) \quad (3.1)$$

em que n_p é o número de parâmetros numéricos e n_R é o número de respostas do problema.

A decisão acerca da inclusão dos parâmetros numéricos no processo de otimização envolve a realização de uma análise de correlação, geralmente realizada com recurso a coeficientes de correlação, os quais estimam a correlação entre os parâmetros numéricos e as respostas obtidas.

Os coeficientes de correlação podem ser obtidos através de coeficientes de correlação paramétricos, caso do coeficiente linear de Pearson ou coeficiente de correlação quadrática, ou não paramétricos caso dos coeficientes de correlação Spearman e de Kendall (Sheskin, 2004).

Ribeiro (2012) apresenta uma comparação entre a utilização de coeficientes de correlação linear de Pearson e de coeficientes de correlação de Spearman, tendo demonstrado a utilidade dos coeficientes de correlação se Spearman sobretudo em amostras que contenham variáveis de grandezas muito distintas. Este coeficiente tem a vantagem de poder avaliar a correlação de variáveis que possam ser ajustadas através de funções monótonas lineares e não lineares, ao contrário do que sucede com o coeficiente de Pearson.

O coeficiente de correlação Spearman (r_{xy}^S) exprime a correlação entre duas amostras em forma de vetor, x e y , a partir dos seus vetores de ordenação $R(x_i)$ e $R(y_i)$, através da seguinte expressão:

$$r_{xy}^S = \frac{\sum_{i=1}^n ((R(x_i) - \bar{R}(x))(R(y_i) - \bar{R}(y)))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \bar{R}(x))^2 \sum_{i=1}^n (R(y_i) - \bar{R}(y))^2}} \quad (3.2)$$

A expressão (3.2) pode ser simplificada para:

$$r_{xy}^S = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.3)$$

em que:

$$D_i = R(x_i) - R(y_i) \quad (3.4)$$

3.3 TÉCNICAS DE EMPARELHAMENTO DE MODOS DE VIBRAÇÃO

As técnicas de emparelhamento têm como principal objetivo estabelecer uma correspondência entre modos experimentais e numéricos o mais eficiente possível, garantindo a estabilidade do processo de otimização.

Esta tarefa é geralmente complexa devido à variabilidade dos parâmetros numéricos durante o processo de otimização que conduz a frequentes alterações da ordem dos modos numéricos. Outro fator está associado ao reduzido número de graus de liberdade dos modos experimentais que provoca um aumento do número de correspondências possíveis entre os modos experimentais e os modos numéricos (Brehm *et al*, 2010).

Na análise de correlação entre os modos de vibração experimentais e numéricos um dos critérios mais utilizados é o parâmetro MAC (*'Modal Assurance Criterion'*) proposto por Allemang e Brown (1982) e que se baseia no conceito matemático de correlação entre vetores.

Existem outras estratégias de emparelhamento de modos de vibração desenvolvidas mais recentemente, as quais assentam em critérios energéticos (Brehm *et al*, 2010; Brehm *et al*, 2009), e que permitem melhorar os critérios clássicos utilizando a informação física da estrutura, mais corretamente a distribuição da rigidez e da massa (Ribeiro, 2012).

Estas estratégias assentes em critérios energéticos não serão abordadas no presente trabalho pelo facto de não ser possível obter a informação física da estrutura devido às limitações impostas pelo programa de cálculo estrutural utilizado, o qual não permite obter diretamente as matrizes de rigidez e de massa do modelo numérico.

3.3.1 Critério de garantia modal - MAC

O parâmetro MAC é um critério clássico, baseado no conceito matemático de correlação entre vetores, que fornece a medida do desvio padrão quadrático entre os vetores numérico e experimental, tomando como referência a reta de correlação linear dos dois vetores (Ribeiro, 2012), podendo ser obtido através da aplicação da seguinte expressão (Allemang, 2003):

$$MAC(\hat{\Phi}_i, \hat{\Phi}_j) = \frac{(\hat{\Phi}_i^T \hat{\Phi}_j)^2}{(\hat{\Phi}_i^T \hat{\Phi}_i)(\hat{\Phi}_j^T \hat{\Phi}_j)} \quad (3.5)$$

onde $\hat{\Phi}_i$ e $\hat{\Phi}_j$ são os vetores dos modos de vibração experimentais (i) e numéricos (j), cuja dimensão é igual ao número de pontos instrumentados.

O parâmetro MAC apresenta como principais vantagens a simplicidade da aplicação, não requerer a informação de todos os graus de liberdade da estrutura, e não depender da normalização dos vetores modais.

O parâmetro MAC é um escalar que pode tomar valores no intervalo entre 0 e 1. O valor de MAC próximo à unidade indica que os vetores modais são correlacionados, por outro lado um valor próximo de zero indica que os vetores modais não são consistentes (Allemang, 2003). Segundo Ewins (2000) um valor de MAC superior a 0,80 indica que estamos na presença de uma boa correlação entre os vetores, por outro lado um valor MAC inferior a 0,20 revela que os modos não se correlacionam. O emparelhamento entre um determinado modo experimental com um modo numérico realizou-se com base no valor do parâmetro MAC mais elevado.

Valores do parâmetro MAC próximos de zero poderão ocorrer por várias razões: 1) quando há não linearidades na estrutura e que dificultam a extração dos modos de vibração experimentais. As técnicas consistentes de identificação modal são apenas aplicáveis a sistemas lineares; 2) quando há ruído nas medições com reflexos no vetor modal experimental; 3) estimativa dos parâmetros modais

incorreta devido a uma má aplicação das técnicas de identificação modal; 4) correspondência incorreta entre os pontos de medição do ensaio experimental e os graus de liberdade da estrutura (Allemang, 2003).

Valores de MAC próximos da unidade indicam geralmente que os vetores modais são correlacionados, no entanto existem situações em que tal não se verifica: 1) medição incompleta dos vetores modais. Esta situação pode ocorrer sempre que sejam selecionados poucos pontos de medição para a determinação dos vetores modais experimentais; 2) vetores modais resultantes de uma excitação forçada indesejada. Esta situação poderá ocorrer quando durante a realização das medições estar a ser utilizado um excitador de massas com um desequilíbrio; 3) os vetores modais são sobretudo ruído coerente em que o parâmetro MAC apenas reflete uma relação linear com o vetor modal de referência; 4) vetores modais representam o mesmo vetor modal com escalas arbitrárias diferentes. A comparação entre dois vetores traduzem o mesmo valor esperado quando normalizados, em que os dois vetores apenas devem divergir no fator de escala da componente complexa. (Allemang, 2003).

Em algumas situações o parâmetro MAC permite relacionar os modos experimentais ou numéricos com eles próprios e por isso tem a designação de AutoMAC. Este parâmetro permite identificar o grau de dependência entre os vetores dos modos numéricos ou experimentais, baseado na ortogonalidade da matriz AutoMAC e na análise dos valores dos termos que se apresentam fora da diagonal principal dessa matriz. Na Figura 3.3 apresentam-se as matrizes AutoMAC entre modos de vibração numéricos considerando um número alargado de graus de liberdade Figura 3.3a e um número reduzido de graus de liberdade Figura 3.3b. A seleção de um número reduzido de graus de liberdade tem como consequência uma maior probabilidade de correlação cruzada com outros modos de vibração numéricos.

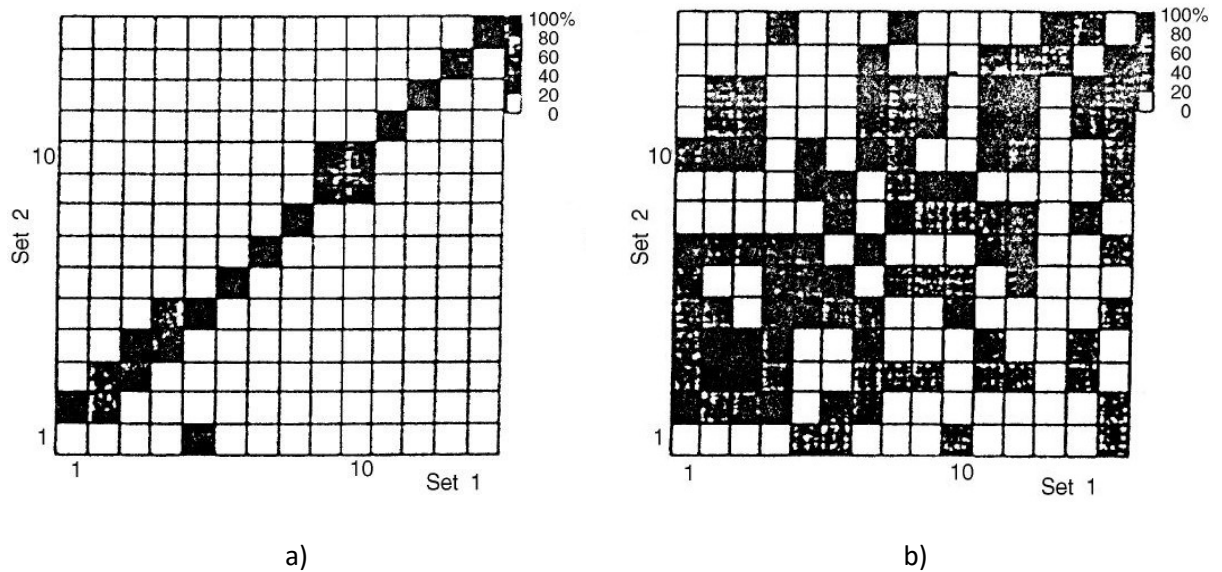


Figura 3.3 — Matriz AutoMAC entre modos numéricos considerando um conjunto de graus de liberdade (Ewins, 2000): a) alargado b) reduzido.

3.4 OTIMIZAÇÃO

A otimização é a fase do processo de calibração que tem por objetivo a determinação dos valores dos parâmetros numéricos que minimizam as diferenças entre as respostas modais numéricas e experimentais.

O processo de otimização envolve o recurso a um algoritmo de otimização que iterativamente procura os valores ótimos dos parâmetros numéricos, que variam dentro de intervalos bem definidos até que seja satisfeito o critério de paragem.

3.4.1 Função objetivo

A função objetivo do processo de otimização é definida pela diferença entre os parâmetros modais numéricos e experimentais, através da seguinte expressão:

$$f(P) = \sum_{i=1}^n |R_i(P) - \hat{R}_i| = \sum_{i=1}^n |r_i(P)| \quad (3.6)$$

onde R_i são as respostas modais numéricas, \hat{R} as respostas modais experimentais, n é o número total de modos de vibração e P representa um conjunto de parâmetros numéricos. O parâmetro r_i é o denominado resíduo e representa a diferença entre as respostas modais numéricas e experimentais.

No presente estudo a função objetivo utilizada inclui os resíduos associados às frequências e aos modos de vibração.

O resíduo das frequências de vibração r_f será determinado a partir das diferenças relativas entre as frequências obtidas por via numérica f e por via experimental \hat{f} , por aplicação da seguinte expressão:

$$r_f(P) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{f(P) - \hat{f}}{\hat{f}} \right| \quad (3.7)$$

A utilização das diferenças relativas permite dar o mesmo peso aos resíduos de cada uma das frequências. Deste modo cada uma das frequências passa a ter um intervalo de variação limitado, entre 0 e 1 (Ribeiro, 2012).

Existem várias definições de resíduos dos modos de vibração apresentados por diversos autores, as quais se podem encontrar no trabalhos de Ribeiro (2012). No presente estudo utilizou-se a definição do resíduo proposto por Brehm (2011), baseada no parâmetro MAC, cuja formulação tem a vantagem de limitar a variação do resíduo ao intervalo entre 0 e 1:

$$r_i(P) = \sum_{i=1}^n (1 - MAC(\Phi, \hat{\Phi})) \quad (3.8)$$

em que Φ e $\hat{\Phi}$ são os vetores dos modos de vibração numérico e experimental respetivamente.

Outro aspeto usualmente considerado na função objetivo consiste na atribuição de pesos diferentes a cada um dos resíduos. A atribuição de pesos mais elevados a um resíduo do que a outro provoca que a minimização da função objetivo incida prioritariamente sobre os resíduos com valores mais elevados, o que tem como consequência uma melhor estimativa das respostas e dos parâmetros numéricos com eles relacionados. A utilização de pesos nos resíduos retira automatismo ao método de calibração, exigindo ao utilizador uma maior sensibilidade, no entanto, torna o processo mais eficiente (Ribeiro, 2012).

3.4.2 Algoritmos de otimização

Os algoritmos de otimização podem ser divididos em dois grandes grupos: os algoritmos de otimização local e os algoritmos de otimização global.

Os algoritmos de otimização local partem de um ponto inicial, é definido pelo utilizador, e a partir deste obtém de forma iterativa outros pontos, com base nas derivadas da função objetivo, que gradualmente se vão aproximando da solução. Estes algoritmos não determinam o mínimo absoluto, mas sim o mínimo relativo mais próximo do ponto de partida (Magalhães, 2003). Um exemplo destes algoritmos são os baseados em gradientes e superfícies de resposta (programação linear e não-linear).

Os algoritmos de otimização global são mais robustos, os quais são capazes de ultrapassar os mínimos locais no caminho para o mínimo absoluto, não precisando de um ponto de partida. Pelo facto de se basearem num processo estocástico, necessitam de um elevado número de variáveis, tornando o processo de otimização mais lento devido ao esforço computacional requerido (Magalhães, 2003).

O algoritmo genético disponibilizado pelo programa MATLAB resolve problemas de otimização global baseado em algoritmos evolutivos. Estes algoritmos baseiam-se no princípio da evolução das espécies, modificando repetidamente uma população de indivíduos usando regras inspiradas sobretudo na combinação de genes por meio da reprodução entre os indivíduos. Devido à sua natureza estocástica, o algoritmo genético melhora as hipóteses de encontrar um mínimo global.

No presente estudo o processo de otimização do modelo numérico foi desenvolvido com recurso ao programa MATLAB (2013), no qual se desenvolveu uma ferramenta baseada nas rotinas de otimização disponibilizadas. O programa dispõe de uma biblioteca de funções de otimização para solucionar problemas de minimização/maximização que satisfaçam um determinado critério de paragem, e que recorram a programação linear e quadrática, não-linear e método dos mínimos quadrados, e também os algoritmos genéticos (MathWorks, 2016).

3.4.3 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos evolutivos foram propostos por Holland (1975) e são baseados numa analogia com a evolução natural das espécies, mais especificamente na Teoria de Darwin. Na evolução natural, os indivíduos de uma população competem entre si para sobreviverem e se reproduzirem, sendo que

sobrevivem os indivíduos cujo código genético lhes confere características que os colocam em vantagem em relação aos restantes (Magalhães, 2003).

Os algoritmos genéticos têm vindo a ser implementados em diversas áreas da engenharia de estruturas, mais concretamente na calibração experimental de modelos numéricos, na otimização estrutural, na identificação de parâmetros modais, na deteção de danos, e ainda no posicionamento ótimo de sensores em ensaios dinâmicos (Brehm, 2011; Gomes e Silva, 2008; Levin e Lieven, 1998; Ribeiro, 2012).

Os algoritmos genéticos tem como principais vantagens (Ribeiro, 2012; Santos, 2014): 1) o número de variáveis aleatórias poder ser elevado (>10); 2) inclusão de um número elevado de restrições; 3) o número de variáveis aleatórias do problema ser superior ao número de respostas do problema, sem a ocorrência de erros numéricos; 4) permitir a resolução de problemas do tipo linear e não linear, o que torna esta formulação mais genérica que a de alguns algoritmos tradicionais; 5) não requerer uma formulação matemática complexa do problema; 6) o espaço de pesquisa ser amplo (é expansível com o decorrer do algoritmo até o encontrar da solução ótima); 7) pesquisa simultânea de soluções ótimas em várias regiões no espaço das variáveis, uma vez que trabalham com uma população e não com um único indivíduo; 8) admitirem tentativas falhadas, ou seja, se não existir uma solução do problema para o conjunto de variáveis aleatórias o algoritmo não é interrompido e prossegue a busca da solução ótima; 9) admitirem variáveis para as quais é possível calcular os gradientes, como, por exemplo, variáveis binárias e discretas; 10) facilidade de paralelização do cálculo; 11) possibilidade de deteção do mínimo global.

Pese embora as inúmeras vantagens, os algoritmos genéticos também apresentam algumas limitações, das quais se destacam: 1) a função objetivo nem sempre é evidente, mostrando-se particularmente sensível na identificação de parâmetros a serem utilizados como variáveis; 2) na implementação do algoritmo genético é necessário definir os parâmetros do algoritmo, os quais na grande parte dos casos são otimizados em função do tipo de problema através de um processo de tentativa-erro; 3) não é adequado para identificar mínimos locais; 4) por vezes revela inconsistências na tentativa de encontrar o valor ótimo global; 5) não existe critério de paragem definido para o processo, sendo o utilizador a definir quando o algoritmo deve parar; 6) elevado tempo computacional para a generalidade dos problemas.

Na Figura 3.4 apresenta-se o fluxograma ilustrativo do funcionamento de um algoritmo genético.

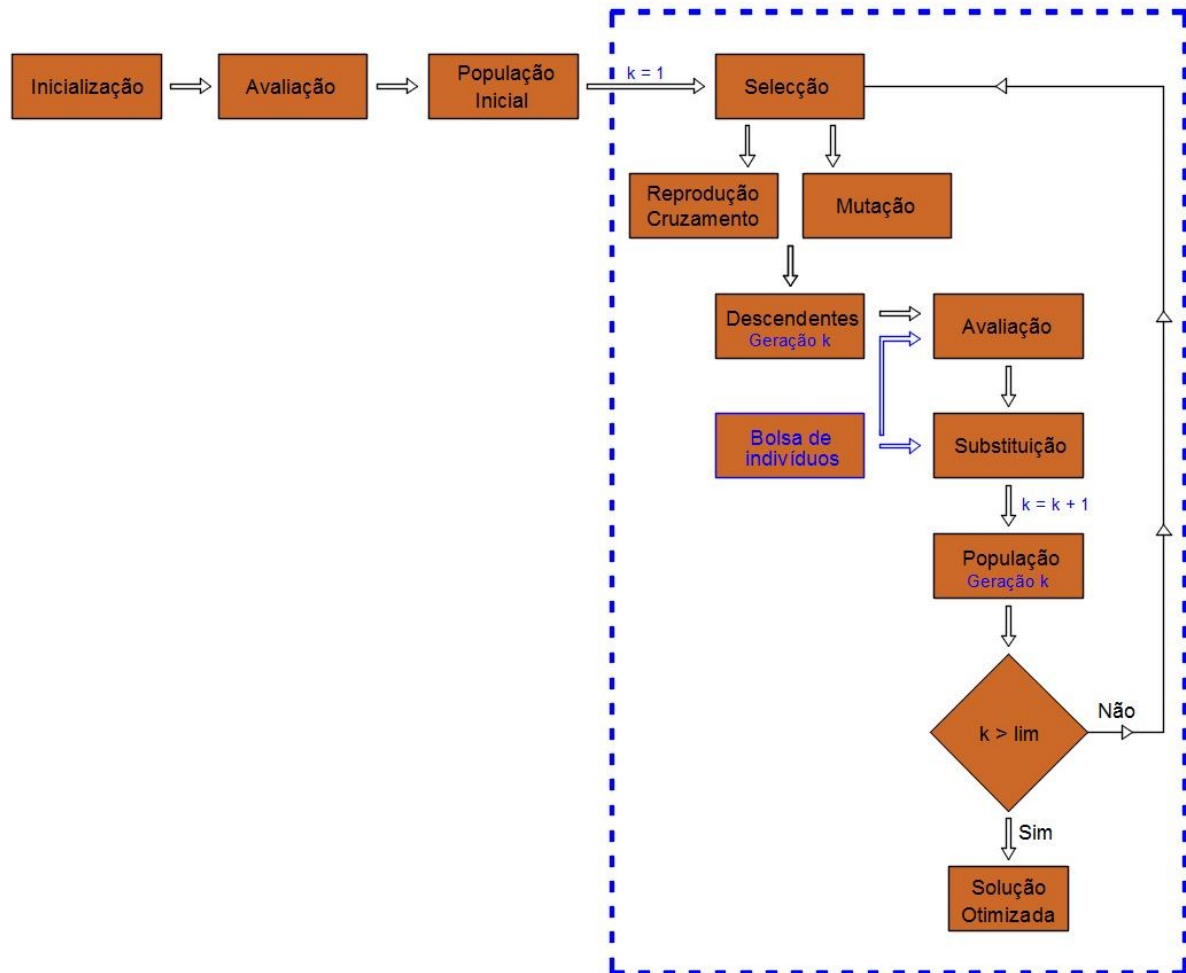


Figura 3.4 — Fluxograma do funcionamento de um algoritmo genético (adaptado de Ribeiro, 2012).

A população inicial é formada por um conjunto de indivíduos gerados aleatoriamente que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é dada uma nota (ou índice) refletindo a sua capacidade de adaptação a um determinado ambiente. Uma percentagem dos indivíduos mais adaptados são selecionados para as fases seguintes, enquanto os outros não avançam. Os indivíduos selecionados podem sofrer modificações nas suas características fundamentais através das operações de mutação e cruzamento gerando os descendentes que constituem a população da próxima geração. Este processo é repetido iterativamente até que seja encontrada a solução ótima.

Nas secções seguintes são apresentados os principais passos na implementação de um algoritmo genético, procurando-se descrever os principais operadores genéticos utilizados. Os métodos e opções apresentadas remetem-se à forma como foram implementados e se encontram disponíveis no MATLAB (2013).

3.4.3.1 População inicial

A geração da população inicial, $k=1$, inicia-se com geração aleatória de um conjunto de indivíduos vistos como possíveis soluções do problema, ou seja, um conjunto de parâmetros do modelo numérico a otimizar. A cada indivíduo gerado está associado um limite inferior e um limite superior. Os genes de cada indivíduo podem ser representados por variáveis discretas, variáveis contínuas ou a partir da junção de variáveis de diferentes tipos.

Segundo Correia (2003) o tamanho da população inicial deverá ser compreendido entre 30 a 100 indivíduos. A sua definição é de especial importância no algoritmo genético porque corre-se o risco de não cobrir todo o espaço das variáveis convenientemente. Por outro lado, uma população mais numerosa poderá implicar um aumento do tempo computacional despendido no processo de convergência.

A população inicial é gerada com recurso a uma técnica estocástica que garante a geração de indivíduos que abranja todo o espaço do intervalo das variáveis com recurso ao método do Hipercubo Latino. Este método mostra-se mais eficaz que outros métodos estocásticos, conforme já referido na secção 3.2.

3.4.3.2 Avaliação

A avaliação de cada indivíduo é baseada no valor da função de avaliação ("*fitness*"), que está relacionada com a função objetivo do problema. Valores da função de avaliação elevados significam uma maior probabilidade de seleção dos indivíduos para a geração seguinte e consequentemente uma função objetivo com um valor mais reduzido (Ribeiro, 2012).

A variação dos valores da função de avaliação afeta o desempenho de um algoritmo genético. Se variarem muito amplamente, os indivíduos com função de avaliação mais elevada reproduzem-se mais rapidamente, assumindo o conjunto de genes de uma população de forma precoce, impedindo o

algoritmo genético de selecionar outras área do intervalo de variação de cada indivíduo. Por outro lado, se os valores da função de avaliação variarem pouco, todos os indivíduos terão aproximadamente a mesma hipótese de reprodução e a seleção evolui muito lentamente (MathWorks, 2016).

A função de avaliação pode ser determinada por classificação (“Rank”), através de uma escala proporcional, por topo e por substituição linear.

A função de avaliação por classificação (“Rank”) avalia os melhores indivíduos com base na classificação (ou ranking) de cada indivíduo. Nestas circunstâncias a classificação do indivíduo que se encontra mais apto é igual a um, o segundo mais apto igual a 2 e assim sucessivamente. O posicionamento de cada indivíduo é proporcional a $1/\sqrt{r}$, em que r é a classificação do indivíduo (MathWorks, 2016).

Na Figura 3.5 apresentam-se os resultados da aplicação da função de avaliação por classificação de uma população tipo de 7 indivíduos (A a G) classificados por ordem crescente.

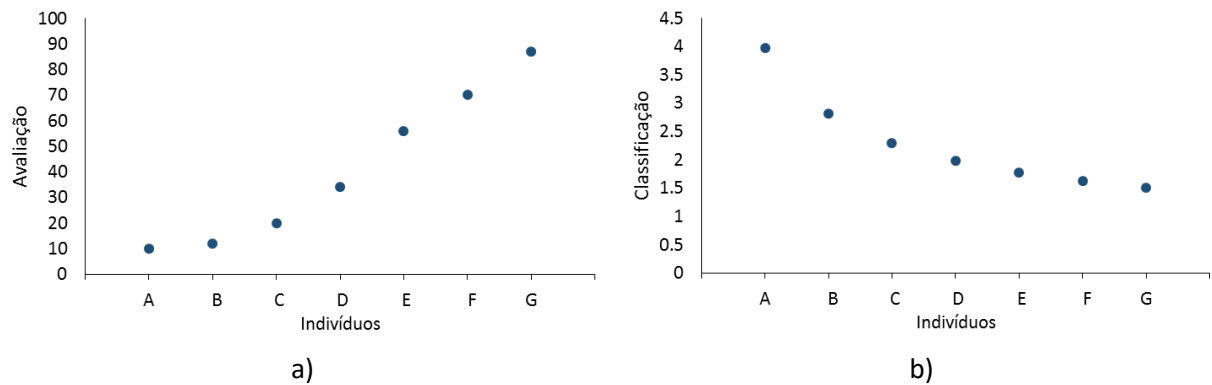


Figura 3.5 — Exemplo de aplicação da função de avaliação por classificação: a) resultados de uma população de 20 indivíduos classificados em ordem crescente; b) valores em escala dos indivíduos por aplicação da função de avaliação por classificação.

Como o algoritmo minimiza a função de avaliação, a classificações dos indivíduos de valor mais baixo têm valor em escala mais elevado. Assim, como o posicionamento de cada indivíduo depende apenas da sua classificação (Figura 3.5a), os valores em escala apresentados serão os mesmos para qualquer população de 7 indivíduos e com um número de reprodutores iguais a 16 (Figura 3.5b).

A Expressão (3.9) resume a aplicação da função de avaliação por classificação, onde R é o número total de reprodutores, r_i é a classificação do indivíduo i , e N é o número de indivíduos de uma população.

$$\frac{R \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{r_i}} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sqrt{r_N}} \right)} \tag{3.9}$$

A função de avaliação através de uma escala proporcional (“*Proportional*”) avalia os valores em escala de um individuo proporcionalmente ao seu valor da função objetivo. Esta estratégia é particularmente sensível quando as classificações de uma população não apresentam uma boa variedade (MathWorks, 2016).

A Expressão (3.10) resume a aplicação da função de avaliação através de uma escala proporcional, onde R é o número total de reprodutores, f_i é a avaliação do indivíduo i , e N é o número de indivíduos de uma população.

$$\frac{R \cdot 2 * \left(\sum_{i=1}^N (f_i) / N \right) \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N (f_i)} \tag{3.10}$$

Na Figura 3.6 apresentam-se os de avaliação através de uma escala proporcional de uma população tipo de 7 indivíduos (A a G) e com um número de reprodutores iguais a 16.

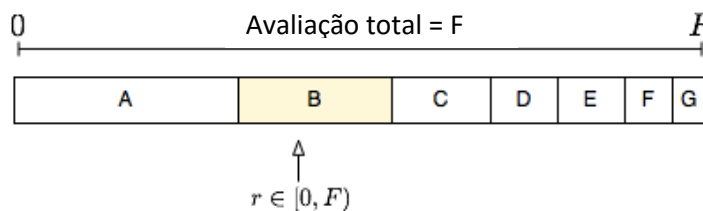


Figura 3.6 — Exemplo aplicação da função de avaliação através de escala proporcional.

A função de avaliação de topo (“*top*”), avalia os melhores indivíduos atribuindo-lhes a mesma classificação. No MATLAB, a seleção de topo exibe um campo adicional (“*Quantity*”) no qual é especificado em percentagem o número de indivíduos aos quais são atribuídos valores positivos (o valor por defeito é 0,4). A quantidade pode ser um número inteiro de 1 até à dimensão da população ou uma fração de 0 até 1, especificando a fração da dimensão da população. Aos melhores indivíduos da população é atribuído o mesmo valor de igual em escala, sendo que os restantes serão considerados nulos (MathWorks, 2016).

A Expressão (3.11) resume a aplicação da função de avaliação de topo, onde R é o número total de reprodutores, Q a percentagem de indivíduos aos quais são atribuídos valores positivos, e N é o número de indivíduos de uma população.

$$\frac{R}{\text{Round}(Q \cdot N)} \quad (3.11)$$

Em que os número de indivíduos selecionados é dado pela expressão $\text{Round}(Q \cdot N)$.

Na Figura 3.7 apresentam-se os resultados da aplicação da função de avaliação de topo de uma população de 7 indivíduos (A a G), considerando um total de 16 reprodutores e uma percentagem de 40% de indivíduos considerados mais aptos, e os restantes considerados nulos.

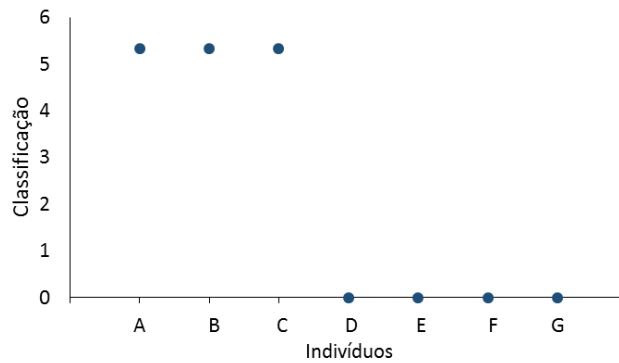


Figura 3.7 — Exemplo de aplicação da função de avaliação de topo.

Por último, a função de aptidão por substituição linear (“*Shift linear*”) seleciona os melhores indivíduos de modo que a expectativa do indivíduo considerado mais apto é igual a uma constante k multiplicada pela classificação média (MathWorks, 2016).

A Expressão (3.12) resume a aplicação da função de avaliação por substituição linear, onde R é o número total de reprodutores, f_i é a avaliação do indivíduo i , $f_{máx}$ é a avaliação do indivíduo mais apto, e N é o número de indivíduos de uma população.

$$\left[\frac{R}{N} - \left(\frac{R}{N} \cdot \frac{k - 1}{-f_{máx} + \frac{\sum_{i=1}^N (f_i)}{N}} \cdot \frac{-\sum_{i=1}^N (f_i)}{N} \right) \right] + \left[\frac{R}{N} \cdot \frac{k - 1}{-f_{máx} + \frac{\sum_{i=1}^N (f_i)}{N}} \right] \cdot f_i \quad (3.12)$$

Se $f_{min} < 0$, onde f_{min} é a avaliação do indivíduo menos apto, a Expressão (3.12) dá lugar à seguinte expressão:

$$\left[\frac{R}{N} - \left(\frac{R}{N} \cdot \frac{\frac{R}{N}}{-\sum_{i=1}^N(f_i) - f_{min}} \cdot \frac{-\sum_{i=1}^N(f_i)}{N} \right) \right] + \left[\frac{R}{N} \cdot \frac{\frac{R}{N}}{-\sum_{i=1}^N(f_i) - f_{min}} \right] \cdot f_i \quad (3.13)$$

Na Figura 3.8 apresentam-se os resultados da aplicação da função de avaliação por substituição linear de uma população de 7 indivíduos (A a G), considerando um total de 16 reprodutores e uma constante k considerada igual a 2.

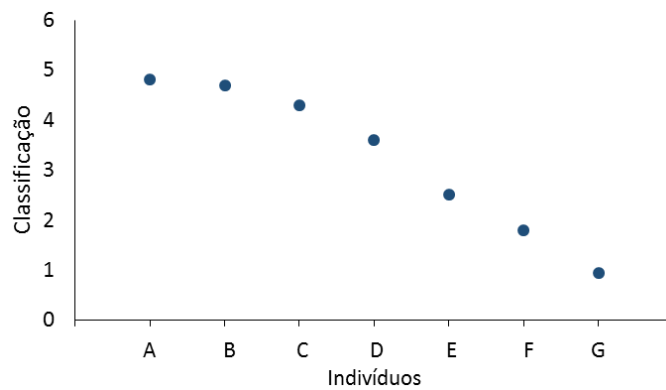


Figura 3.8 — Exemplo de aplicação da função de avaliação por substituição linear.

A título de exemplo, na Figura 3.9 apresenta-se a comparação dos resultados de dois problemas de otimização com recurso a algoritmos genéticos, para um problema de minimização da função objetivo de uma população que compreende um total de 100 gerações, utilizando a função de avaliação por classificação (Rank scaling) e de topo (Top scaling). Na análise verifica-se que ambos os casos convergem para a mesma solução ótima do problema. Verifica-se também que a variação das populações ao longo do problema de otimização para o caso da função de avaliação por classificação apresentou uma maior variação no intervalo das variáveis comparativamente ao problema de otimização que utilizou a função de avaliação de topo, o que permite concluir que a função de avaliação de topo garante a seleção de um maior número de variáveis que compreendem o intervalo de variação de cada indivíduo.

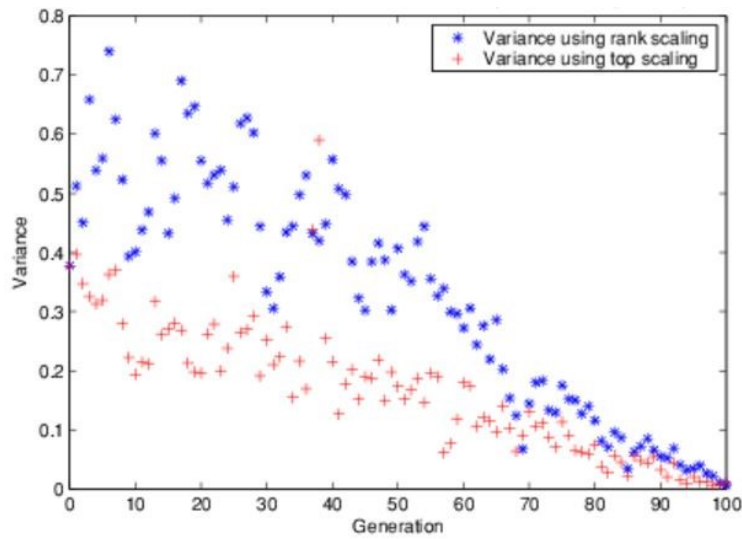


Figura 3.9 — Evolução da função objetivo por aplicação função de avaliação por classificação (Rank scaling) e de topo (Top scaling) (adaptado de MathWorks, 2016).

3.4.3.3 Seleção

A seleção especifica a forma como são escolhidos os reprodutores para a geração seguinte.

A seleção dos reprodutores é tipicamente realizada por aplicação de um dos seguintes métodos estocásticos: método uniforme, método da roleta russa, método de seleção decimal (“*remainder selection method*”) e ainda pelo método do torneio.

O método uniforme define uma linha na qual cada um dos reprodutores está limitado a uma porção da linha de comprimento proporcional ao seu valor da função de avaliação. O algoritmo move-se ao longo da linha com marcadores de tamanho igual, sendo que a cada marcador o algoritmo atribui um reprodutor.

Na Figura 3.10 apresentam-se os resultados da aplicação do método uniforme de uma população de 7 indivíduos (A a G), considerando um total de 6 reprodutores (R1 a R6).

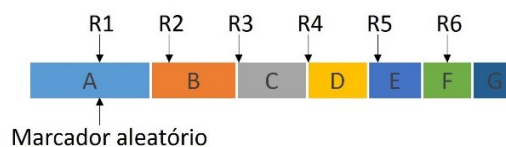


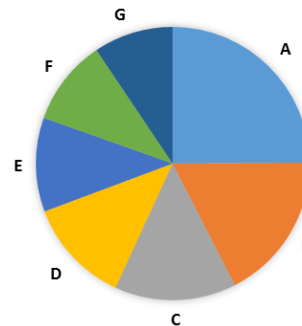
Figura 3.10 — Exemplo de aplicação do método uniforme.

No método da roleta russa a seleção dos reprodutores é realizada simulando uma roleta, na qual a área da roleta correspondente a cada indivíduo é proporcional ao seu valor da avaliação. A roleta é jogada e selecionam-se os indivíduos por sorteio, sendo que os indivíduos com maior valor de avaliação tem uma maior probabilidade de serem selecionados. Neste método é permitido que o mesmo indivíduo possa ser selecionado mais do que uma vez.

Na Figura 3.11 apresenta-se um exemplo da aplicação do método da roleta russa a uma população de 7 indivíduos (A a G). Na Figura 3.12a apresenta-se uma tabela com os valores da função de avaliação $f(x)$ de uma população constituída por 7 indivíduos (A a G)..

Indivíduos	$f(x)$
A	3,982
B	2,816
C	2,299
D	1,991
E	1,781
F	1,626
G	1,505

a)



b)

Figura 3.11 — Método da roleta russa : a) valores da função de avaliação de uma população de 7 indivíduos; b) roleta russa.

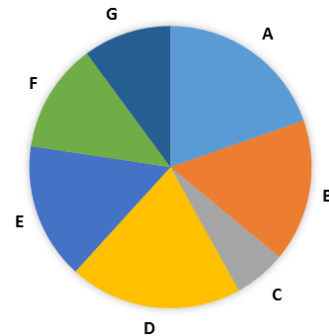
O método de seleção decimal (*“remainder selection method”*) seleciona reprodutores deterministicamente com base na parte inteira do maior valor da função de avaliação do indivíduo, e, de seguida, usa o método da roleta russa para selecionar os restantes reprodutores com base na parte restante do valor, ou seja, a parte decimal. A título de exemplo, se o maior valor da função de avaliação de um indivíduo é de 2,3, este indivíduo será considerado para reprodutor duas vezes porque a parte inteira é igual a 2. Os reprodutores são atribuídos de acordo com o valor de ordem da parte inteira, neste caso 2, sendo os restantes reprodutores escolhidos estocasticamente com base na sua parte decimal. A probabilidade de um reprodutor ser escolhido com base na sua parte decimal é proporcional ao valor da parte fracionada do seu valor (MathWorks, 2016).

Na Figura 3.12 apresentam-se os resultados da aplicação do método de seleção decimal de uma população de 7 indivíduos (A a G). Na Figura 3.12a apresenta-se uma tabela com os valores da função de avaliação $f(x)$ de uma população constituída por 7 indivíduos (A a G). O indivíduo mais apto é o A,

cujo valor da parte inteira é igual a 3, o qual será considerado para reproduzir 3 vezes. À parte decimal da população é aplicado o método da roleta russa (Figura 3.12b).

Indivíduos	f(x)	Parte Decimal
A	3,982	0,982
B	2,816	0,816
C	2,299	0,299
D	1,991	0,991
E	1,781	0,781
F	1,626	0,626
G	1,505	0,505

a)



b)

Figura 3.12 — Método de seleção decimal: a) valores da função de avaliação de uma população de 7 indivíduos; b) roleta russa da parte decimal.

A seleção por torneio consiste na realização de um torneio para o qual são previamente selecionados indivíduos de forma aleatória. De cada torneio sai vencedor o indivíduo com o maior valor da função de avaliação, que é selecionado para reproduzir. O torneio tem de ser jogado por um número de indivíduos que varia de 2 ao número de indivíduos da população. O número de participantes no torneio está relacionado com a pressão exercida na seleção dos melhores indivíduos. Assim, quanto maior for o número de participantes no torneio, maior é a pressão na seleção, fazendo com que aumente a probabilidade dos melhores indivíduos serem selecionados.

3.4.3.4 Reprodução (ou cruzamento)

A reprodução ou cruzamento (“*crossover*”) é o operador que cria novos indivíduos denominados de descendentes, através da combinação dos genes de dois indivíduos designados por reprodutores. Esta operação permite agregar as melhores características dos reprodutores nos seus descendentes, possibilitando assim que os genes dos melhores indivíduos passem de geração em geração, garantindo a diversidade da população e a eficiência do algoritmo. As abordagens mais utilizadas são o cruzamento uniforme, cruzamento num ponto e cruzamento em dois pontos, que se enquadram no âmbito dos designados cruzamentos discretos. O programa MATLAB disponibiliza ainda o cruzamento intermédio, o cruzamento heurístico e o cruzamento aritmético, que por sua vez são enquadrados nos designados cruzamentos agregados, os quais são mais indicados para os casos em que há mutações no problema de otimização (MathWorks, 2016).

No cruzamento uniforme é criado um vetor binário aleatório (formado por valores 0 e 1) que seleciona os genes de dois reprodutores (R_1 e R_2), atribuindo o valor de 1 aos genes do reprodutor R_1 e o valor de 0 aos genes do reprodutor R_2 , (Figura 3.13) e combinando os genes formando os descendentes (D_1 e D_2) de modo como se apresenta na Figura 3.13a.

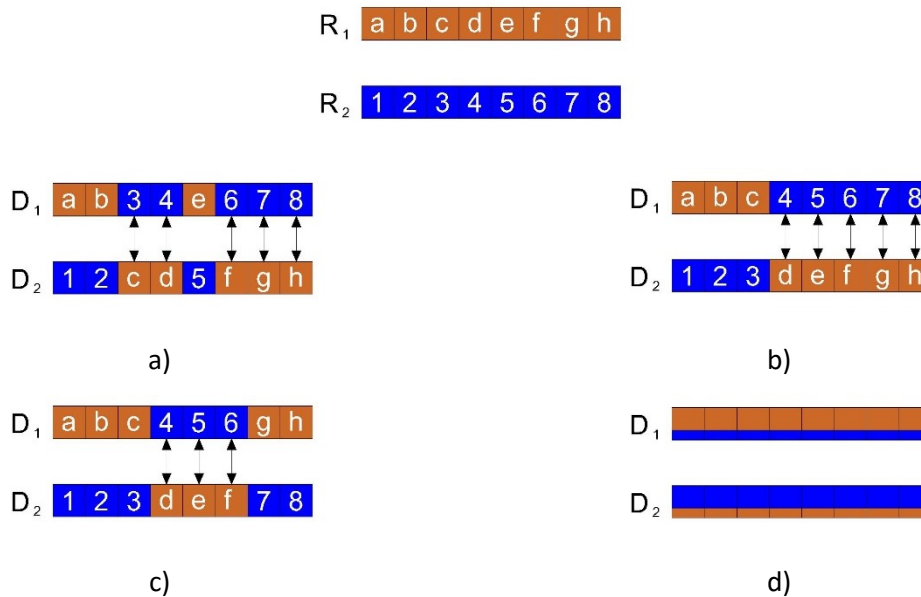


Figura 3.13 — Operação de reprodução: a) cruzamento Uniforme; b) cruzamento num ponto; c) cruzamento em dois pontos; d) cruzamento intermédio, heurístico e aritmético.

O cruzamento num único ponto, é o operador de reprodução mais aplicado, e envolve a aplicação de um ponto de corte nos genes dos indivíduos reprodutores, gerado de forma aleatória, originando dois segmentos que são trocados entre os dois indivíduos gerando dois novos descendentes (Figura 3.13b). O cruzamento em dois pontos é similar ao cruzamento em um ponto, no entanto envolve a aplicação de dois pontos de corte, gerando assim três segmentos distintos que são trocados entre os indivíduos reprodutores e gerando dois novos descendentes (Figura 3.13c).

Nos cruzamentos agregados os descendentes resultam da combinação entre genes dos reprodutores (Figura 3.13d) e não da troca de informação genética dos reprodutores.

Assumindo os reprodutores (R_1 e R_2) definidos por:

$$R_1 = \{P_1^1, \dots, P_n^1\} \tag{3.14}$$

$$R_2 = \{P_1^2, \dots, P_n^2\} \tag{3.15}$$

No caso do cruzamento intermédio é definida uma taxa de cruzamento $\gamma \in [0,1]$ definida pelo utilizador. Cada gene i do descendente D_1 , designado por c_i^1 , é definido por:

$$c_i^1 = P_i^1 + rand * \gamma * (P_i^2 - P_i^1) \quad (3.16)$$

Em que $rand \in [0,1]$ corresponde à geração de um número arbitrário.

O cruzamento heurístico garante que os descendentes vão conter maioritariamente a informação genética do reprodutor com o melhor valor de avaliação, neste caso assumiu-se o reprodutor R_2 . O valor da taxa de cruzamento γ é também especificado pelo utilizador (MathWorks, 2016):

$$c_i^1 = P_i^2 + \gamma * (P_i^1 - P_i^2) \quad (3.17)$$

No caso do cruzamento aritmético os valores dos genes dos descendentes correspondem à média aritmética entre dois reprodutores, ou seja:

$$c_i^1 = \frac{P_i^1 + P_i^2}{2} \quad (3.18)$$

Os cruzamentos intermédios, heurísticos e aritméticos só podem ser aplicados quando há restrições lineares no problema de otimização ou quando não são definidos intervalos de variação das variáveis (MathWorks, 2016).

3.4.3.5 Mutação

A mutação é um operador que possibilita a modificação aleatória de um ou mais genes dos descendentes, e a sua probabilidade de ocorrência é definida com base na denominada taxa de mutação (Oliveira, 2005). O objetivo do operador mutação assenta na garantia da diversidade genética permitindo que o algoritmo genético expanda o seu intervalo de procura.

O programa MATLAB dispõe de três tipos de operadores de mutação: a mutação gaussiana, a mutação uniforme e a mutação adaptativa.

A mutação gaussiana adiciona um valor aleatório obtido a partir de uma distribuição gaussiana com média 0, a cada gene do reprodutor. O desvio-padrão (τ_k) dessa distribuição é determinado através de definição do parâmetro de escala (S) e do parâmetro redutor (S_k) (MathWorks, 2016).

O parâmetro de escala determina sobretudo o desvio-padrão da primeira geração (τ_1) e o parâmetro redutor controla a variação do desvio-padrão de geração em geração. Assim o desvio-padrão da geração k (τ_k) é definido através da seguinte expressão:

$$\tau_k = \tau_{k-1} \left(1 - S_k \frac{k}{G} \right) \tag{3.19}$$

onde k é a geração atual e G é o número total de gerações.

Na Figura 3.14 apresentam-se dois problemas de otimização que compreenderam um total de 200 gerações. No primeiro caso foi considerado o parâmetro de escala (S) igual a 1 (Figura 3.14a), e no segundo caso foi considerado o parâmetro de escala (S) igual a 0,5 (Figura 3.14b). Da análise verifica-se que o primeiro caso a distância entre indivíduos tende a diminuir à medida que aumenta o número de gerações, convergindo para zero no limite de gerações do problema de otimização. No segundo caso, a distância entre indivíduos ao longo das gerações diminui à razão de 1/2 no limite de gerações do problema de otimização. Como resultado a distância entre indivíduos diminui menos no segundo caso, comparativamente ao primeiro caso de otimização (MathWorks, 2016).

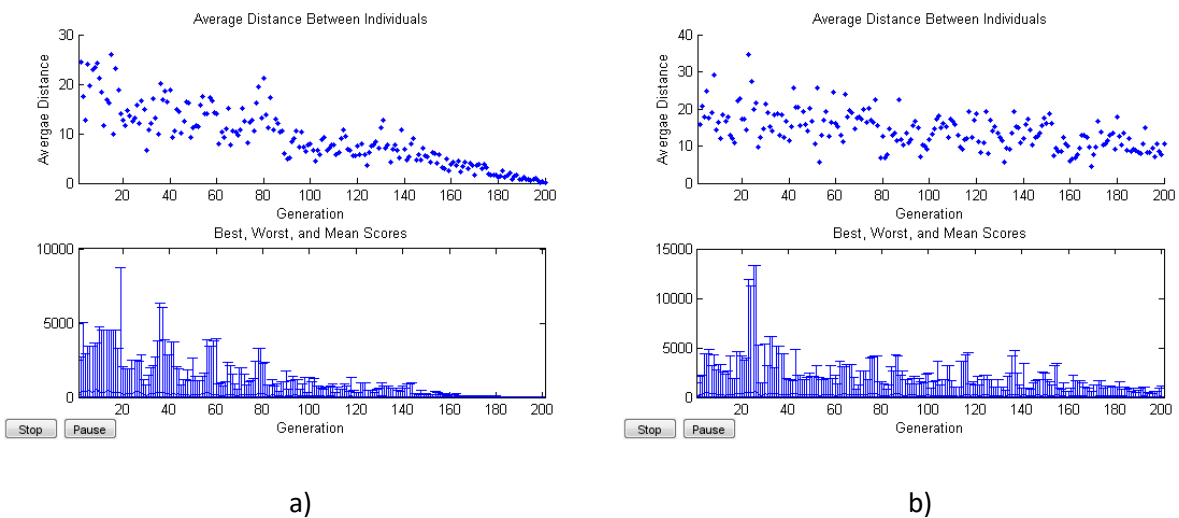


Figura 3.14 — Mutação Gaussiana (adaptado de MathWorks, 2016): a) parâmetro de escala (S) igual a 1; b) parâmetro de escala (S) igual a 0,5.

A muta o uniforme   um processo que envolve dois passos. No primeiro passo, o algoritmo seleciona um conjunto de indivíduos em que a cada um   atribuída uma probabilidade de ocorrer muta o (taxa de muta o). No segundo passo, o algoritmo substitui os genes de cada indivíduo selecionado por

novos genes gerados aleatoriamente de modo uniforme a partir dos correspondentes intervalos de variação (MathWorks, 2016).

Na mutação adaptativa a taxa de mutação associada a cada geração é gerada de forma aleatória e tem em consideração o sucesso ou insucesso dos indivíduos da geração anterior, tornando-se por isso num processo adaptativo e dinâmico.

3.4.3.6 Substituição

A operação de substituição especifica as condições em que os indivíduos se movimentam entre as populações de diferentes gerações. Quando a substituição ocorre, os melhores indivíduos de uma população anterior, que fazem parte de uma bolsa de indivíduos, substituem os piores indivíduos da população atual.

Com a bolsa de indivíduos é possível garantir nas gerações futuras a existência de um conjunto de indivíduos julgados mais aptos, denominados de elites, permitindo assim que esses indivíduos de cada geração possam ser recuperados das operações de reprodução ou mutação. Assim sendo, a definição de elites traduz-se pela salvaguarda dos indivíduos mais aptos de cada geração, evitando que sejam perdidos pelo facto de não terem sido selecionados para reprodução, ou mesmo destruídos nas operações de reprodução e mutação. Segundo Correia, (2003) cada elite tem um tamanho reduzido, na ordem de 1 ou 2 indivíduos.

No programa MATLAB a operação de substituição a bolsa de indivíduos é constituída, no mínimo por um indivíduo designado elite. A operação de substituição pode ser controlada de três formas distintas: por direção, por um intervalo e também por uma fração de indivíduos

A operação de substituição controlada por direção permite que, se se optar pela direção de avanço, a substituição ocorra na direção da última população. Isto é, as elites da última população substituem os indivíduos menos aptos da próxima geração. Se optarmos por escolher duas direções, recuo e avanço, as elites de uma determinada população vão substituir os indivíduos menos aptos da população anterior e da população seguinte, respetivamente. Importa ainda referir que as elites da última população poderão migrar para a primeira população e vice-versa.

A operação de substituição controlada por intervalo especifica o número de indivíduos de uma população que passam para a próxima sem que ocorra substituição.

A operação de substituição controlada por fração de indivíduos específica a percentagem de indivíduos que se movimentam entre populações de diferentes gerações, ou seja, o número de elites. Assim se numa população de 20 indivíduos considerarmos uma fração de 0,1, só 2 indivíduos dessa população serão considerados elites.

3.4.3.7 Restrições

Na generalidade dos casos, os algoritmos genéticos resolvem problemas de otimização que incluem restrições do tipo igualdade e desigualdade. No caso do programa MATLAB o algoritmo genético resolve problemas com restrições lineares e não-lineares. Deverão ser tidas em consideração algumas particularidades na utilização dos operadores genéticos com restrições: i) são satisfeitas as restrições lineares e as restrições nos intervalos das variáveis utilizando as operações de reprodução e mutação que gerem apenas pontos viáveis; ii) a operação de mutação gaussiana não obedece necessariamente às restrições nos intervalos das variáveis. Nestas inconsistências deverá ser utilizada a mutação adaptativa; iii) com exceção da reprodução heurística todos os tipos de reprodução satisfazem as restrições lineares e as restrições dos intervalos das variáveis (MathWorks, 2016).

3.4.3.8 Critérios de paragem

O critério de paragem de um algoritmo genético determina o momento em que deve terminar o processo evolutivo, ou se o mesmo deverá avançar para uma nova geração. Estes critérios, são geralmente definidos através de um limite do número de gerações, um limite de tempo, um limite de tempo por geração, ou mesmo quando o valor da função objetivo é menor ou igual a um valor de referência.

Como os algoritmos genéticos são processos estocásticos sujeitos a alguma variabilidade, a dimensão da população, a seleção dos parâmetros dos operadores genéticos, tais como a taxa de cruzamento, a taxa de mutação, são fundamentais na estabilidade e convergência para a solução ótima. É uma boa prática realizar previamente uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais sensíveis e que contribuam para uma melhor convergência para a solução ótima.

3.4.3.9 Estratégias de otimização

O programa MATLAB disponibiliza duas estratégias para a obtenção da solução ótima: uma estratégia de procura local e uma estratégia de procura global.

Na Figura 3.15, a título de exemplo, apresenta-se a evolução do processo de otimização assente nas estratégias de procura de mínimos globais (Figura 3.15a) e com mínimos locais (Figura 3.15b).

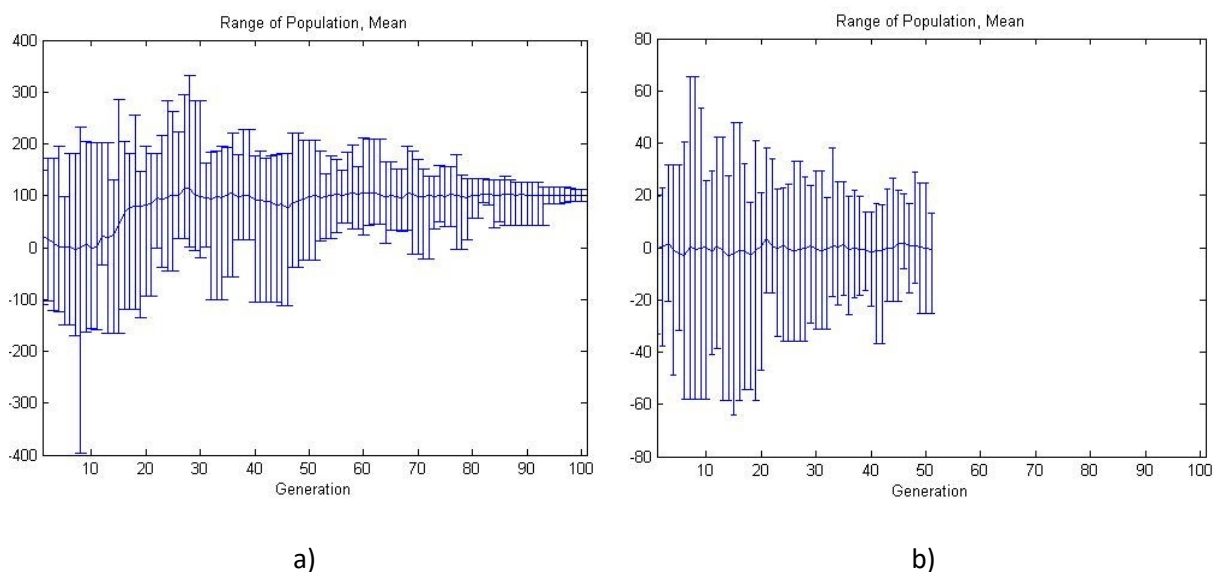


Figura 3.15 — Estratégias de procura (adaptado de MathWorks, 2016): a) mínimos globais; b) mínimos locais.

A estratégia de busca global assenta na procura generalizada em todo o espaço das variáveis, e tem como objetivo obter uma primeira aproximação da solução ótima. Esta estratégia baseia-se nos operadores de reprodução e mutação, e adotando valores de taxas de cruzamento e mutação elevados. A operação de substituição é baseada numa bolsa de indivíduos alargada a um número significativo de indivíduos de gerações. Importa ainda referir que esta estratégia exige um elevado esforço computacional, no entanto a sua aplicação é recomendada numa primeira identificação do espaço das variáveis, ou quando não é identificável a localização da solução ótima (Ribeiro, 2012).

A estratégia de procura local está assente no refinamento de uma solução pré-existente próxima da solução ótima, e baseia-se apenas no operador de mutação, com uma população inicial reduzida, podendo ser o resultado de uma estratégia de busca global, ou uma solução proposta pelo utilizador. Na maioria das situações, esta estratégia permite a obtenção de mínimos globais (Figura 3.15a).

Um dos fatores mais importantes que determina o desempenho de um algoritmo genético é a diversidade da população. Se a distância média entre indivíduos é grande, a diversidade é alta. Por outro lado, se a distância entre indivíduos é pequena, a diversidade da população é baixa. Conseguir equilibrar bem a diversidade da população é uma tarefa bastante exigente. Se a diversidade for demasiado alta, ou demasiado baixa, o algoritmo poderá não funcionar corretamente (MathWorks 2016).

Na Figura 3.16 apresentam-se dois gráficos ilustrativos da evolução da função objetivo e da distância média entre indivíduos de cada geração, em função do número de indivíduos de gerações. Nos gráficos é possível verificar que na fase inicial do processo de otimização há um decaimento exponencial, ao qual procede uma tendência para estabilização. Por outro lado com a evolução do processo de otimização existe uma tendência para a diminuição da distância média entre os indivíduos de cada geração.

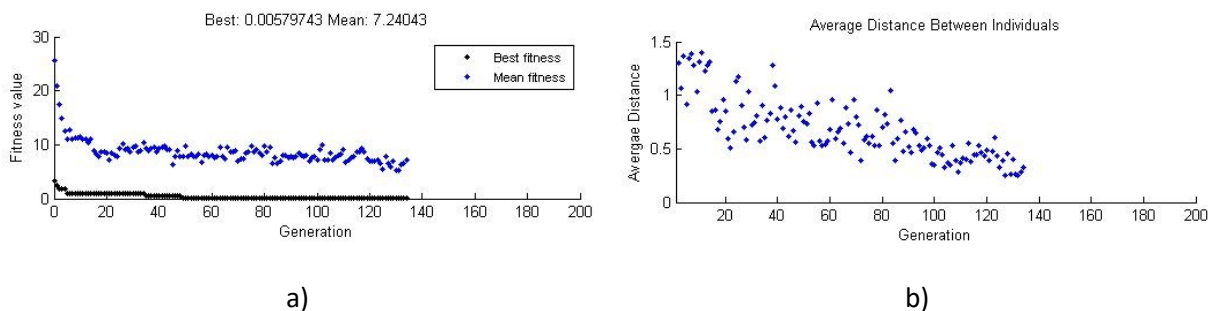


Figura 3.16 — Evolução da função objetivo e da distância média entre indivíduos de cada geração, num problema de otimização em função do número de gerações (adaptado de MathWorks, 2016): a) evolução da função objetivo; b) evolução da distância média entre indivíduos.

3.5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO ITERATIVO

No âmbito do presente trabalho foi desenvolvida uma aplicação computacional iterativa que visa a calibração de modelos numéricos com base em algoritmos genéticos. A implementação computacional envolveu o recurso a três programas comerciais: ROBOT (2015), Excel (2013) e MATLAB (2013). A interação entre os programas, visa a procura da solução ótima do problema, minimizando as diferenças dos resíduos das frequências e modos de vibração numéricos e experimentais. Para tal, o algoritmo genético considera como variáveis os parâmetros do modelo numérico e como respostas os valores dos parâmetros modais.

3.5.1 Descrição da metodologia iterativa

Na Figura 3.17 apresenta-se o fluxograma ilustrativo da metodologia iterativa de otimização de modelos numéricos baseado num algoritmo genético indicando os programas intervenientes nas diferentes fases do processo.

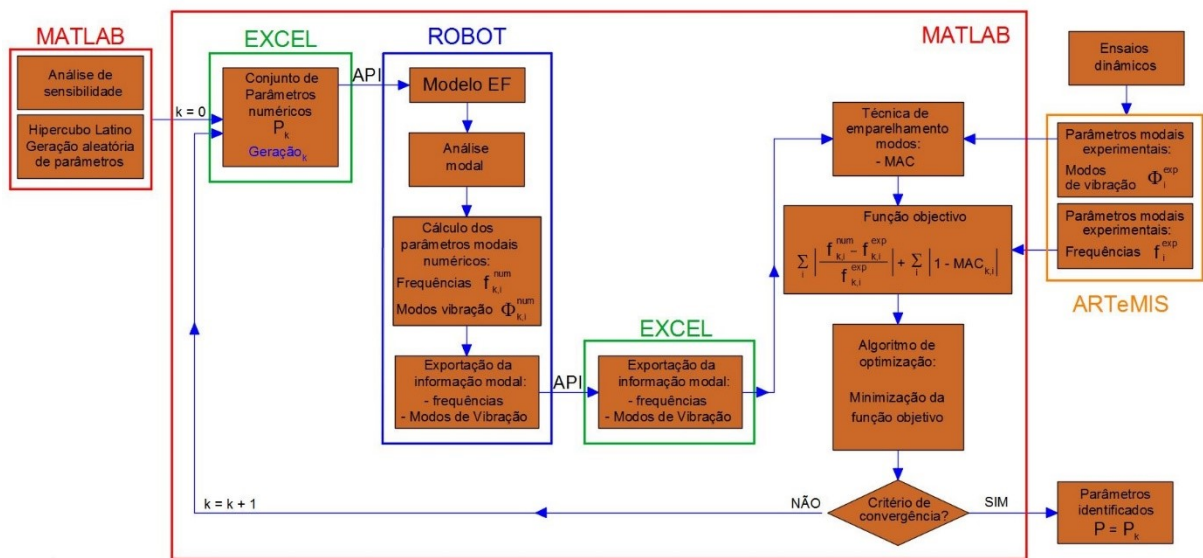


Figura 3.17 — Fluxograma da metodologia iterativa de otimização de modelos numéricos.

No programa ROBOT é definido o modelo numérico de elementos finitos baseado num conjunto de parâmetros P_k , em que k representa o número de indivíduos de cada geração. Neste programa é realizada a análise modal do modelo numérico, sendo extraídos os parâmetros modais, nomeadamente a frequências e os modos de vibração, e exportados num ficheiro Excel. Com recurso ao programa MATLAB, e por aplicação do método do Hiper-cubo Latino, é gerado de forma aleatória o conjunto de parâmetros numéricos que constituem os indivíduos da geração 1.

A seleção dos parâmetros e os seus intervalos de variação são definidos no programa MATLAB e após a realização de uma análise de sensibilidade, são seleccionados os indivíduos que serão incluídos no processo de optimização.

No programa MATLAB, a partir da informação modal numérica e experimental é realizado o emparelhamento dos modos de vibração com base no parâmetro MAC. Com os valores das frequências de vibração e os respetivos valores do parâmetro MAC, são determinados os resíduos das

frequências de vibração e dos modos de vibração numéricos e experimentais, determinando-se assim o valor da função objetivo associada a cada indivíduo por aplicação da Expressão (3.5).

Por aplicação de uma rotina que comporta o algoritmo genético (ver Anexo IV), são criados novos conjuntos de valores para os parâmetros do modelo numérico, constituindo assim os indivíduos da próxima geração ($k+1$), tendo em vista a minimização dos resíduos da função objetivo. Este processo é realizado iterativamente até que o critério de convergência seja satisfeito.

No âmbito do presente trabalho foram introduzidos alguns melhoramentos à ferramenta desenvolvida por Ribeiro et al. (2012) e que permitiram melhorar a sua versatilidade e eficiência computacional, em particular: i) a possibilidade da modelação numérica da estrutura ser realizada num programa convencional de cálculo automático de estruturas, neste caso o programa ROBOT; ii) a implementação, em ambiente EXCEL, de rotinas API do programa ROBOT, que possibilitam uma interligação eficiente do modelo numérico ao algoritmo de otimização, nomeadamente na extração dos parâmetros modais numéricos, do ROBOT para o MATLAB, e na introdução de novos valores dos parâmetros no modelo numérico, do MATLAB para o ROBOT, e iii) a aplicação dos algoritmos genéticos com base nas rotinas existentes no programa MATLAB.

3.5.2 Interface – ROBOT – EXCEL (Robot API)

A exportação dos parâmetros numéricos do programa MATLAB para o ROBOT, assim como a importação dos parâmetros modais calculados no programa ROBOT para o MATLAB, é assegurada através de uma rotina do tipo *Robot API* (“*Application Programming Interface*”) assente em linguagem de programação VBA e desenvolvida em ambiente EXCEL (ver Anexo III). A folha de cálculo EXCEL possibilita uma interligação eficiente ao nível da troca de dados entre os programas MATLAB e ROBOT.

Contudo as rotinas do tipo *Robot API* apresentam limitações na extração e exportação de alguns tipos de resultados, em particular não possibilita que sejam extraídas as matrizes de massa, rigidez e de amortecimento da estrutura, cuja informação é relevante na análise modal de estruturas e também de técnicas de emparelhamento de modos de vibração mais avançadas como é o caso do parâmetro EMAC.

No presente trabalho foi desenvolvida uma rotina em Robot API (ver Anexo 2), que envolveu a programação de uma “Macro” inserida numa folha de cálculo Excel. Na Figura 3.18 apresenta-se um fluxograma da aplicação *Robot API* na interface entre os programas MATLAB e ROBOT.

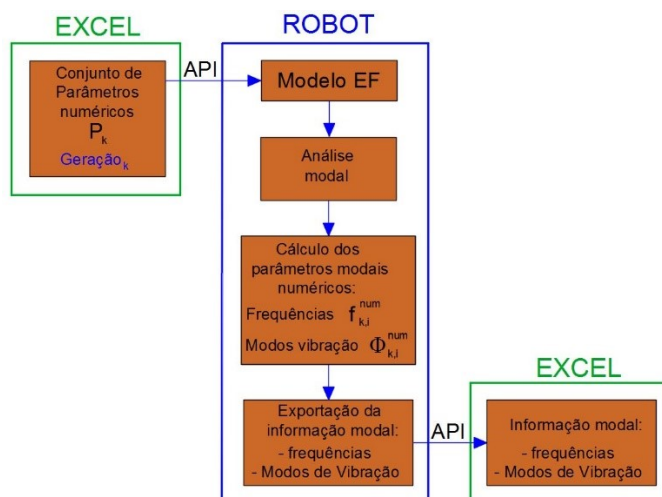


Figura 3.18 — Fluxograma da aplicação *Robot API*.

O funcionamento da interface API permite a transferência dos valores dos parâmetros numéricos, nomeadamente, do módulo de elasticidade e da massa volúmica do betão, entre outros, que são provenientes do programa MATLAB, para um conjunto de células da folha Excel, que por sua vez serão. Inseridos/substituídos no modelo numérico de elementos finitos pré-desenvolvido no programa ROBOT.

Após a inserção dos novos valores das propriedades dos materiais é realizada a análise modal do modelo numérico de elementos finitos, procedendo-se em seguida à importação dos valores das frequências e dos modos de vibração para a folha Excel.

4 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS DEGRAUS DE BANCADA DO ESTÁDIO DO DRAGÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a caracterização experimental do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão.

Para o efeito foi realizada uma inspeção visual aos degraus de bancada incidindo, sobretudo, em possíveis anomalias no betão e nos apoios dos degraus de bancada.

Foram realizadas duas campanhas experimentais que envolveram ensaios dinâmicos de vibração forçada e que permitiram avaliar os parâmetros modais, em particular as frequências naturais, os modos de vibração, os coeficientes de amortecimento de diversos degraus das bancadas norte e sul do Estádio do Dragão.

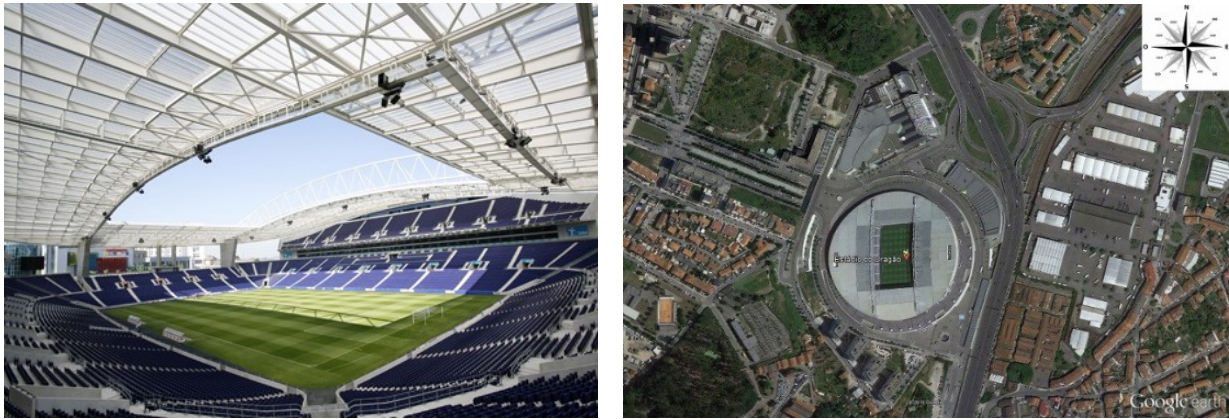
Foram ainda realizados ensaios de caracterização do betão com recurso à técnica de ultra-sons com o objetivo de extrair o valor do módulo de elasticidade do betão utilizado nos degraus de bancada.

Os resultados experimentais servirão de base à calibração experimental de um modelo numérico de elementos finitos dos degraus de bancada.

4.2 O ESTÁDIO DO DRAGÃO

4.2.1 Descrição geral

O estádio do Dragão encontra-se localizado na cidade do Porto e foi construído por ocasião do Campeonato da Europa de Futebol de 2004 tendo sido inaugurado no ano de 2003. Na Figura 4.1 apresenta-se uma vista geral e uma vista aérea do Estádio do Dragão.



a) b)

Figura 4.1 — Estádio do Dragão: a) vista geral; b) vista aérea.

O estádio está organizado em quatro bancadas (sul, poente, norte e nascente) e tem a capacidade de 50092 espectadores, compreendendo 4 bancadas: sul, poente, norte e nascente. As bancadas norte e sul são constituídas por um único nível, enquanto as bancadas nascente e poente são constituídas por dois níveis, um inferior e outro superior. Nas Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam-se dois cortes estruturais localizados nas zonas poente-nascente e sul-norte respetivamente.

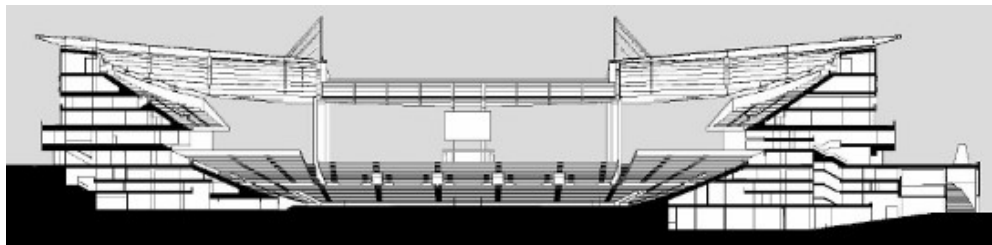


Figura 4.2 — Estádio do Dragão, corte Poente – Nascente (adaptado de Marques, 2009).

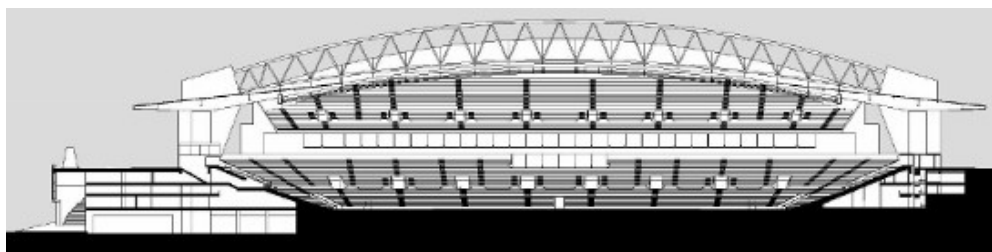


Figura 4.3 — Estádio do Dragão, corte sul - norte (adaptado de Marques, 2009).

A estrutura do estádio é dividida em 12 corpos estruturalmente independentes, separados por juntas de dilatação (Figura 4.4).

A estrutura de cada corpo é constituída por um conjunto de pórticos afastados entre si de 8,10 m no perímetro de intradorso, e 10,50 m no perímetro da periferia. Cada pórtico é constituído por pilares e vigas de betão armado que suportam os pavimentos e os degraus de bancada. Os pórticos são ligados entre si por meio de vigas horizontais ao nível dos pavimentos, formando em planta um sistema estrutural em grelha plana. No total existem 84 pórticos principais distribuídos radialmente ao longo do estádio.

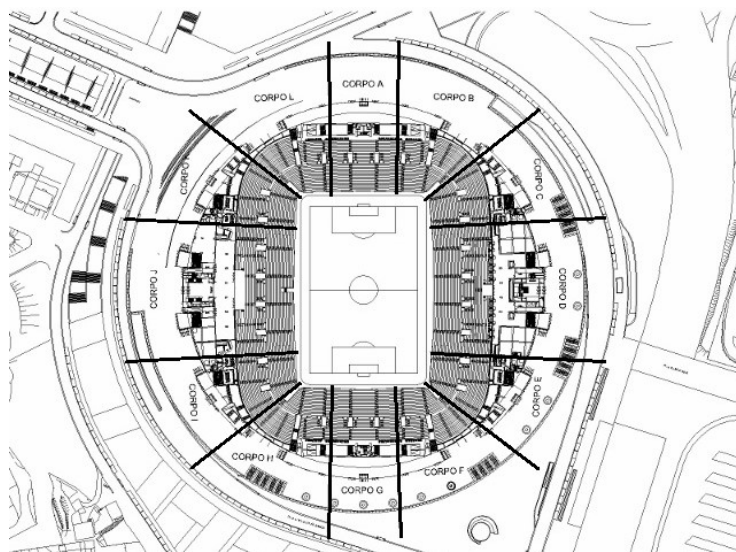


Figura 4.4 — Estádio do Dragão: Planta dos corpos estruturais (GEG, 2002).

Em vários pórticos das bancadas superiores usaram-se cabos de pré-esforço pós tensionados, integrados nos pórticos da estrutura de betão armado (Figura 4.5), mais precisamente, nas vigas de apoio dos degraus de bancada e nas vigas de apoio do *concourse* superior, que atingem um vão em consola de 6,0 m com uma área de influência de 10 m (Marques, 2009).

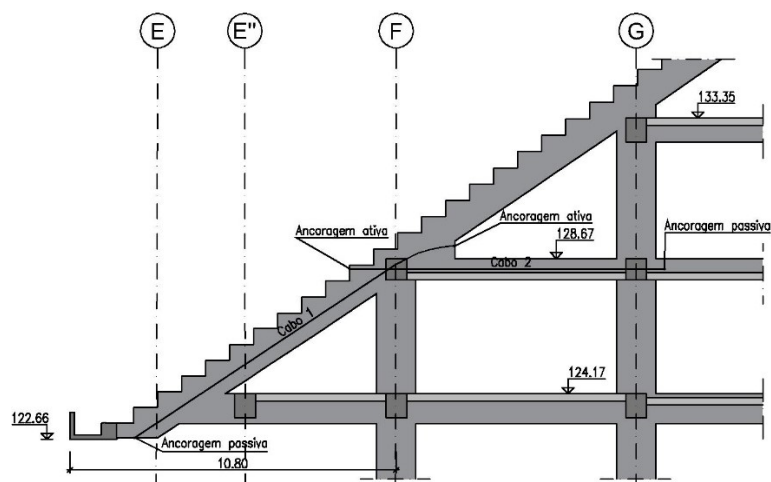


Figura 4.5 — Consola pré-esforçada da bancada superior (adaptado de Marques, 2009).

As bancadas inferiores têm pórticos correntes com vãos de 8,0 m que são vencidos por vigas de betão armado com 50×90 cm². O tramo da extremidade junto ao relvado apresenta soluções distintas consoante os corpos, nomeadamente (Figura 4.6): i) recurso a aparelhos de apoio, no alinhamento A; ii) recurso a uma viga pré-fabricada apoiada em cachorro, no alinhamento B, ou ainda, iii) recurso a uma rótula na ligação ao pilar, também no alinhamento B.

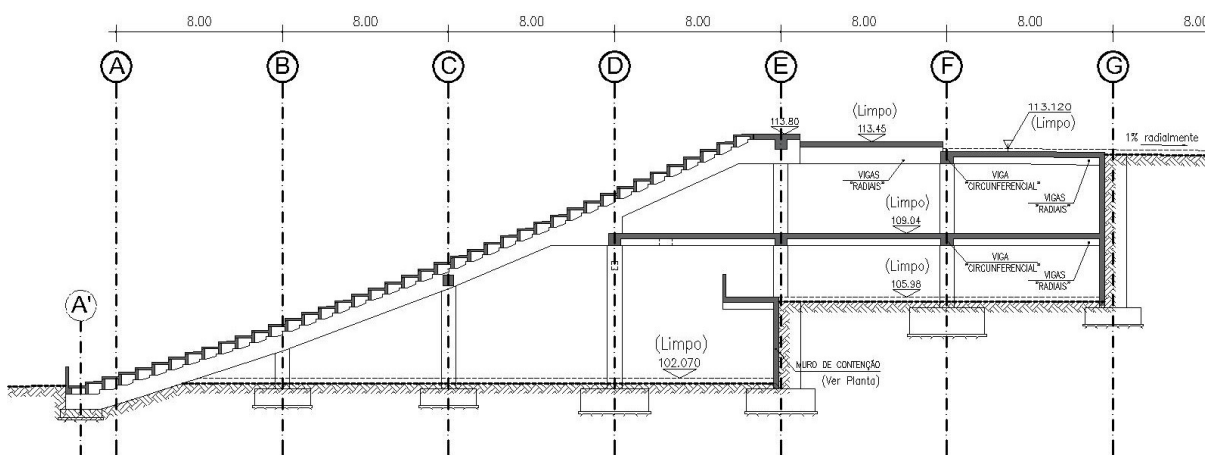


Figura 4.6 — Pórtico principal tipo da bancada norte (adaptado de Marques, 2009).

4.2.2 Os degraus de bancada

Os degraus de bancada os elementos pré-fabricados em betão armado (Figura 4.7). Os degraus estão apoiados nas vigas dos pórticos radiais, com um vão que varia à medida que o afastamento entre os pórticos aumenta do intradorso para a periferia, sendo o vão máximo de 9,30 m.



Figura 4.7 — Degraus de bancada do estádio do Dragão.

Os degraus das bancadas inferiores são elementos pré-fabricados em betão armado em forma de T (Figura 4.8a). Os degraus são formados por um patamar, de espessura igual a 0,10 m e vão igual a

0,80 m, que apoia numa nervura vertical com 0,15 m de espessura e altura variável entre 0,48 m a 0,63 m, consoante a posição do degrau nos pórticos da bancada.

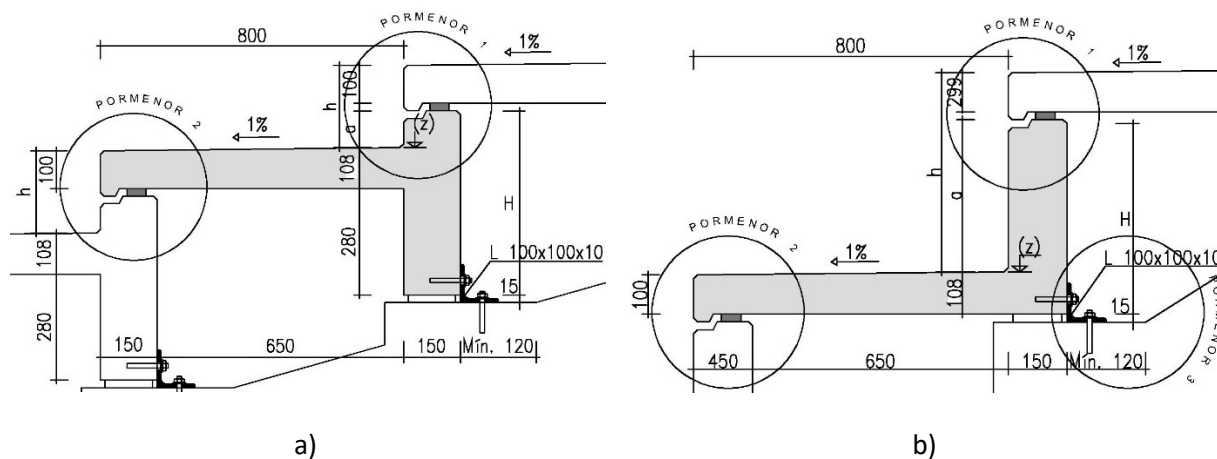


Figura 4.8 — Geometria dos degraus: a) tipo T (bancada inferior); b) tipo L (bancada superior).

As bancadas superiores são constituídas por degraus em forma de L (Figura 4.8b), de modo a permitir uma melhor visibilidade, e impondo uma maior inclinação da bancada.

Na direção radial, a ligação entre os degraus de bancada é garantida, de um modo alternado, por intermédio de ligações rígidas, através de 5 conectores metálicos do tipo M20 (Figura 4.9a), e por ligações flexíveis realizadas por intermédio de 5 apoios em borracha EPDM com dimensões de 500×50×20 mm (Figura 4.9b). Na Figura 4.10 apresenta-se o desenho tridimensional dos degraus de bancada com a indicação das ligações rígidas e flexíveis realizadas de modo alternado entre degraus. Na direção perimetral cada degrau de bancada encontra-se separado dos vizinhos por meio de juntas.

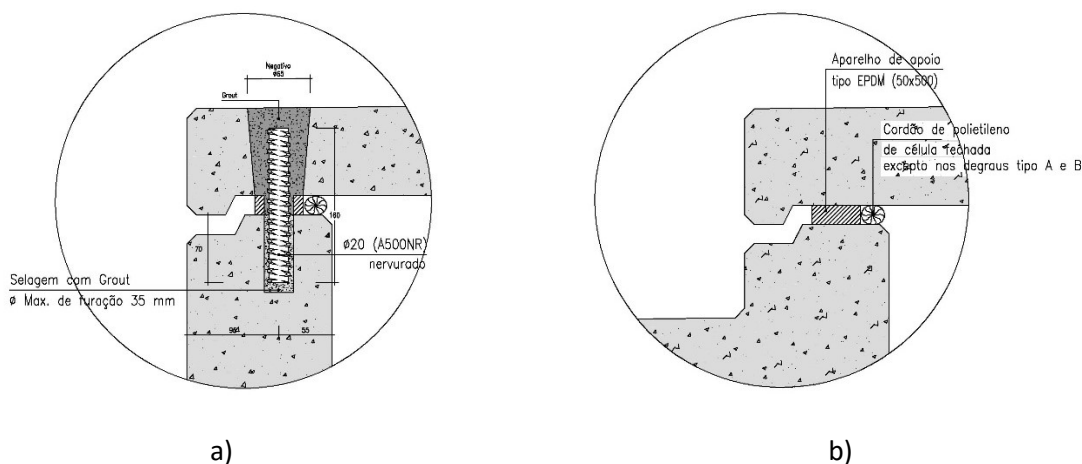


Figura 4.9 — Pormenores de ligação entre degraus: a) ligação rígida (pormenor 1, Figura 4.8a); b) ligação flexível (pormenor 2, Figura 4.8b).

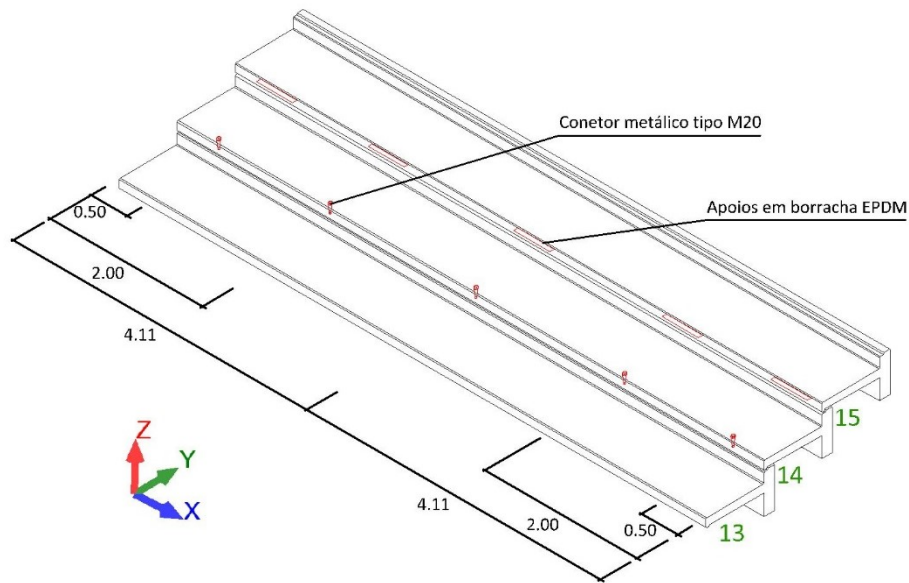


Figura 4.10 — Indicação das ligações rígidas e flexíveis entre degraus de bancada.

Cada degrau encontra-se apoiado nos pórticos de bancada por meio de um dispositivo de fixação constituído por uma cantoneira metálica L100×100×10 que está ligada à nervura vertical do degrau e à viga do pórtico da bancada por meio de dois conectores metálicos do tipo M12. Entre a base da nervura do degrau e a viga da bancada existe ainda uma lâmina em neoprene com dimensões de 150×120×15 mm de espessura (Figura 4.11).

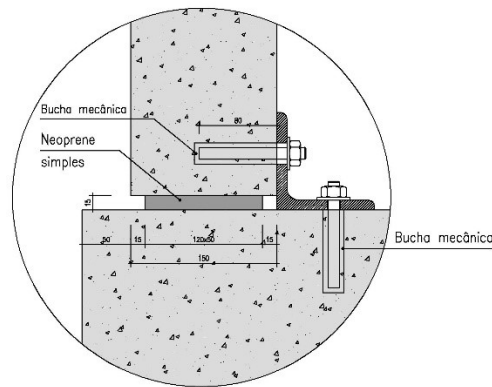


Figura 4.11 — Pormenor de fixação dos degraus à viga de bancada (pormenor 3, Figura 4.8b).

Estes dispositivos de ligação têm o comportamento, de um dos lados, como apoio móvel, e do lado oposto como um apoio simples (Figura 4.12). Entre a viga de bancada e o dispositivo de fixação existe um aparelho de apoio em neoprene.

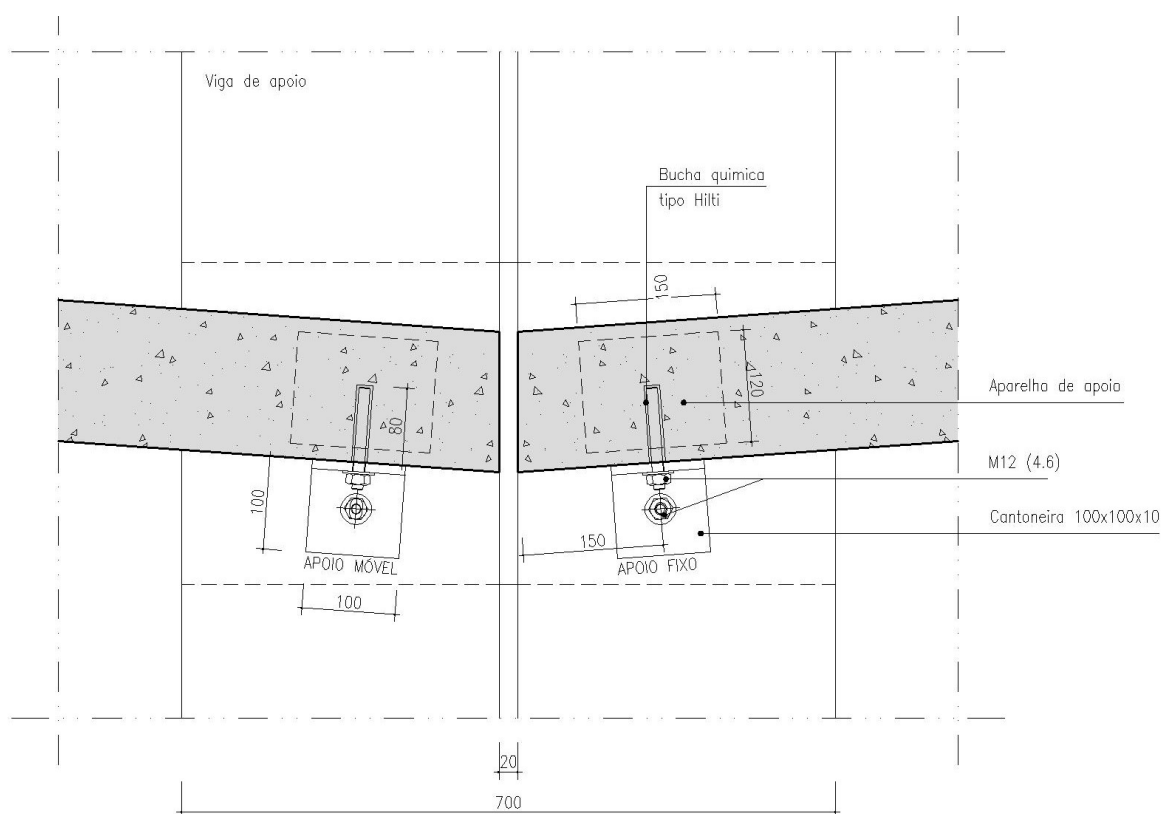


Figura 4.12 — Zona de apoio dos degraus nas vigas de bancada.

Os lugares de bancada são constituídos por uma estrutura metálica, formada por um perfil tubular de secção quadrada, com apoio de chão, e com acabamento pintado, e cujos assentos são em polipropileno de textura macia (Figura 4.13).

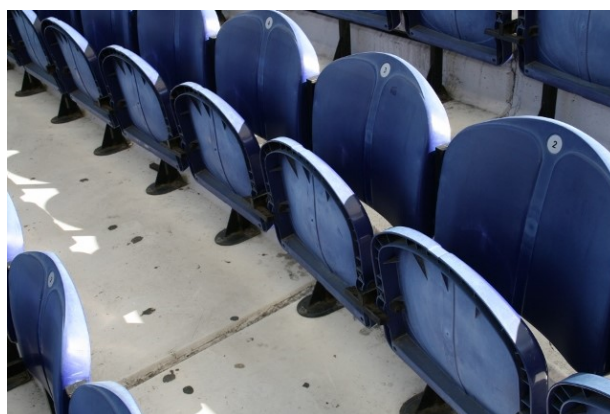


Figura 4.13 — Lugares de bancada do Estádio do Dragão.

4.2.3 Inspeção visual

Com o intuito de validar a informação de projeto, foi realizada uma inspeção visual aos degraus de bancada incidindo, sobretudo, em possíveis anomalias no betão e nos apoios dos degraus de bancada. A inspeção visual foi realizada em março de 2015 e complementada com informações visuais recolhidas aquando à execução do estádio (GEG, 2002).

Na Figura 4.14 apresentam-se dois pormenores dos degraus de bancada com base nas fotografias tiradas aquando da construção do estádio (GEG, 2002), e onde é possível constatar a elevada porosidade do betão da nervura do degrau (Figura 4.14a), além das condições de apoio, serem diferentes das previstas em projeto, nomeadamente o apoio de neoprene tem uma altura superior aos 15 mm previstos e a cantoneira metálica não está ligada à viga de bancada conforme previsto em projeto (Figura 4.14b).



Figura 4.14 — Montagem dos degraus de bancada durante construção do Estádio do Dragão (GEG, 2002): a) porosidade elevada na nervura do degrau; b) pormenor do apoio na viga de bancada.

Foi ainda possível verificar que os degraus de bancada pré-fabricados foram fornecidos por dois fabricantes distintos, a PRÉGAIA e a CIVIBRAL, de onde poderão resultar diferenças ao nível das características de resistência mecânicas.

Na Figura 4.15 ilustram-se várias situações identificadas na inspeção visual aos degraus de bancada, onde é possível distinguir apoios de degraus de bancada com várias camadas de neoprene e cantoneiras metálicas com calços de neoprene na ligação à viga de bancada (Figura 4.15a), cantoneira metálica com calço de neoprene na ligação à nervura do degrau (Figura 4.15b), cantoneiras de fixação

colocadas em diferentes faces dos degraus (Figura 4.15c) e casos de degraus sem fixação materializada através da cantoneira metálica (Figura 4.15d).



a)



b)



c)



d)

Figura 4.15 — Pormenores dos apoios dos degraus de bancada: a) múltiplas camadas de neoprene e cantoneira com calço de neoprene na base; b) cantoneira metálica com calço de neoprene lateral; c) cantoneiras metálicas localizadas em faces diferentes das nervuras dos degraus; d) apoio de degraus sem cantoneira metálica.

Em alguns degraus de bancada as zonas dos apoios foram seladas com uma material não identificado de modo a garantir uma separação entre compartimentos mais eficiente (Figura 4.16a). Verificou-se também que alguns dos apoios foram materializados através de consolas curtas (Figura 4.16b). Na Figura 4.16b também é visível a elevada porosidade presente nas nervuras dos degraus de bancada.

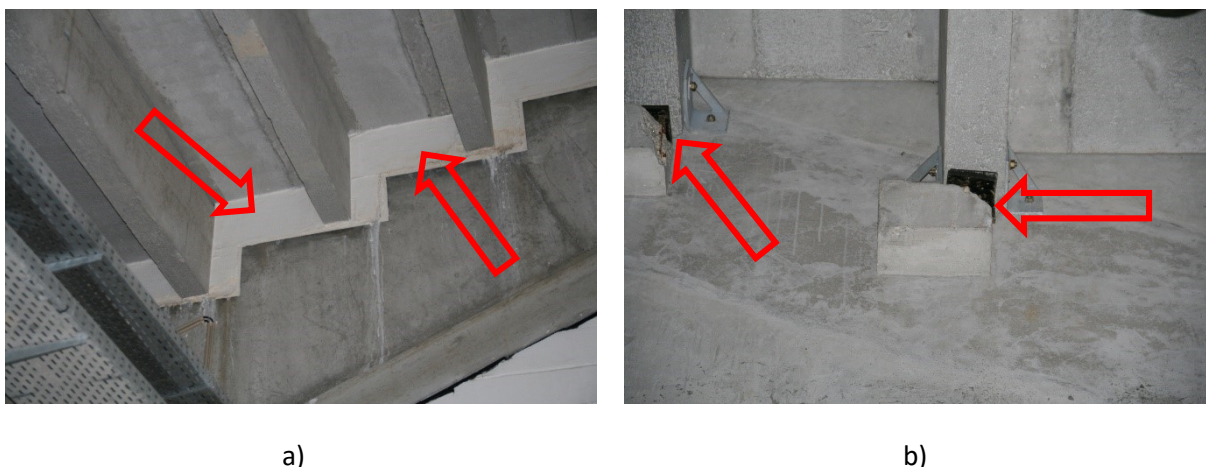


Figura 4.16 — Pormenores dos apoios dos degraus de bancada existentes no Estádio do dragão: a) selagem com material não identificado; b) fixação dos degraus em cachorros.

Da inspeção visual foram possíveis identificar, essencialmente, duas situações anómalas: i) uma elevada porosidade do betão das nervuras dos degraus que é comum à generalidade dos degraus de bancada; ii) o tipo de condições de apoio apresentam uma elevada variabilidade de degrau para degrau.

4.3 ENSAIOS DINÂMICOS

Nesta Secção são descritos os ensaios dinâmicos realizados aos degraus das bancadas norte e sul do Estádio do Dragão. A realização dos ensaios teve a colaboração do LEST – Laboratório de Estruturas, do ISEP, e do LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural, da FEUP.

Estes ensaios foram realizados em duas fases: a fase 1, realizada em junho de 2015, teve como objetivo a identificação das propriedades modais de um conjunto de degraus de bancada, nomeadamente, as suas frequências naturais, os modos de vibração (globais e locais) e os coeficientes de amortecimento; a fase 2, que teve lugar em agosto de 2015, incidiu na identificação modal de 10 degraus de bancada localizados nas bancadas norte e sul com o objetivo de avaliar a variabilidade dos valores das frequências e coeficientes de amortecimento de degraus com idênticas condições geométricas e de apoio.

4.3.1 Planeamento dos ensaios

Na fase 1 foi realizado um ensaio cujo objetivo principal foi identificar as propriedades modais locais de um degrau de bancada, nomeadamente as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento. Para isso recorreu-se à instrumentação do degrau de bancada sul da fila 14 assim como os degraus das duas filas adjacentes (Fila 13 e 15). Adicionalmente foram também instrumentados alguns pontos localizados nos pórticos de suporte no qual se apoiam os degraus de bancada (Figura 4.18).

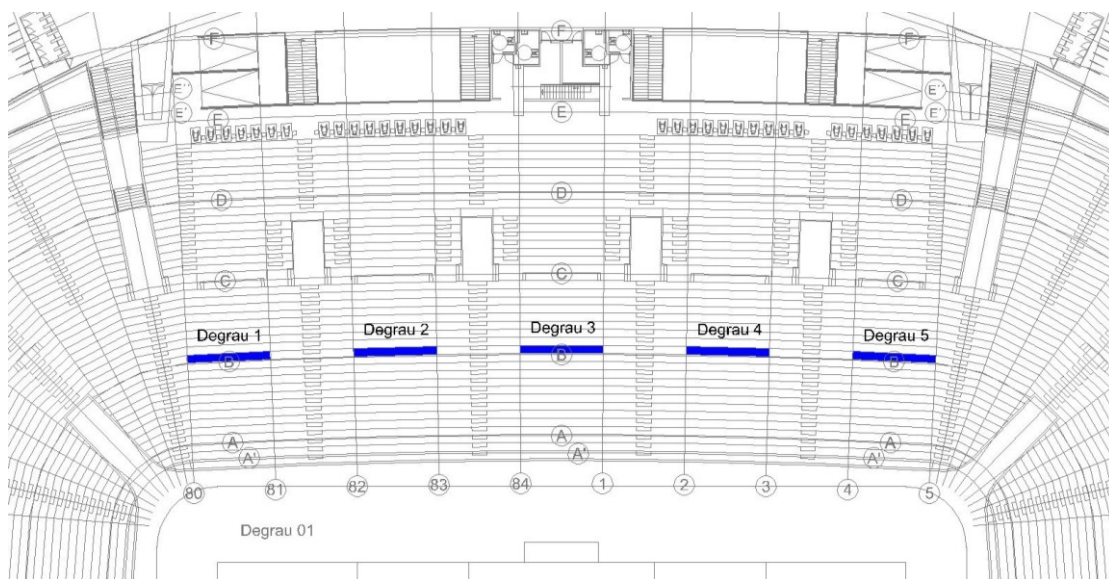
Na fase 2 foram realizados ensaios dinâmicos a 10 degraus individuais das bancadas norte e sul, com o objetivo de identificar as propriedades modais, nomeadamente, as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento. Posteriormente será realizada uma análise comparativa entre os parâmetros modais identificados nos ensaios de cada degrau de bancada (Figura 4.17).

O planeamento da fase 2 dos ensaios envolveu a seleção de um conjunto de degraus de bancada cujas dimensões e características geométricas e mecânicas fossem semelhantes.

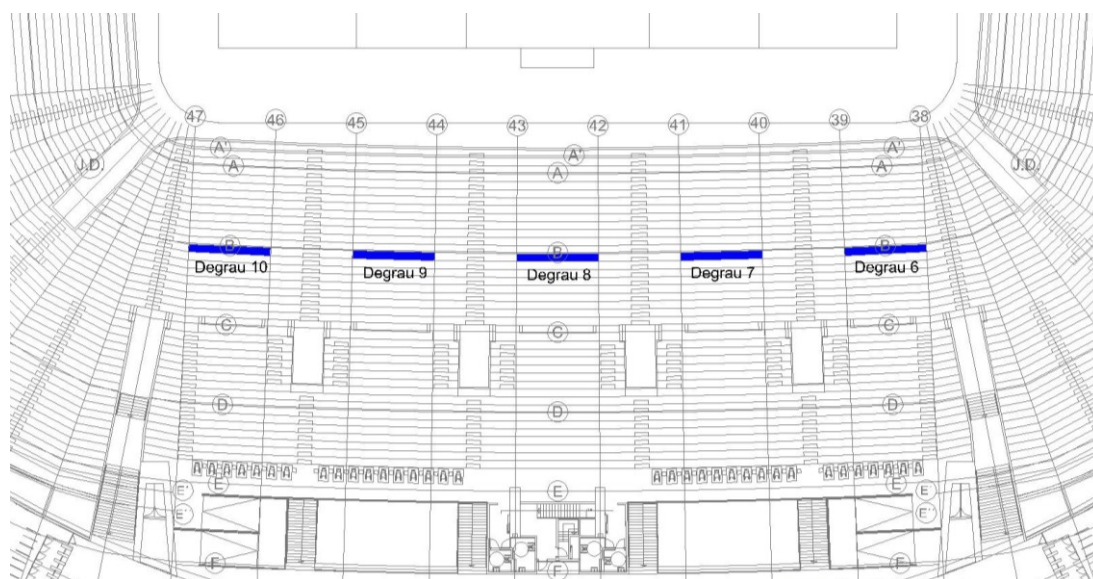
Com base na análise do projeto de execução do estádio foram identificados os degraus de bancada com características semelhantes (Figura 4.17a e Figura 4.17b) na bancada norte (entre o pórtico 80 e o pórtico 5) e na bancada sul (entre o pórtico 38 e o pórtico 47). Alguns dos degraus de bancada suportam troços de degraus acesso às bancadas, e por isso apresentam características distintas dos restantes degraus.

No planeamento da fase 2 dos ensaios, e atendendo a que o objetivo do estudo está relacionado com a identificação dos parâmetros modais locais dos degraus de bancada, e não dos parâmetros globais que envolvem os pórticos de bancada, foram selecionados degraus que se apoiam sobre os pilares dos pórticos de suporte. Deste modo garante-se que os modos de vibração dos pórticos de bancada interferem pouco nos modos de vibração locais dos degraus.

As bancadas inferiores norte e sul são aquelas que geralmente recebem mais público, no caso particular da bancada sul devido à claque principal do Futebol Clube do Porto. Face ao exposto optou-se por selecionar os degraus de bancada da fila 14, a qual se encontra sobre os pilares do alinhamento estrutural B (Figura 4.17), num total de 10 degraus: 5 localizados na bancada norte (Figura 4.17a) e cinco na bancada sul (Figura 4.17b).



a)



b)

Figura 4.17 — Identificação dos degraus de bancada para a fase 2: a) bancada norte (Degrau 1 a 5);
b) bancada sul (Degrau 6 a 10).

4.3.2 Fase 1

4.3.2.1 Descrição

A fase 1 dos ensaios dinâmicos envolveu a medição das respostas dinâmicas em 49 pontos de medida, posicionados sobre um conjunto de degraus adjacentes da bancada sul, e que foram organizados em quatro configurações de medição.

A seleção do número e posição dos pontos a instrumentar foi baseada na informação modal recolhida do modelo numérico dos degraus de bancada (ver Capítulo 5). Procurou-se garantir a identificação do maior número de modos de natureza distinta e evitar que os sensores de referência estivessem localizados em nodos dos modos de vibração.

A identificação dos modos de vibração locais dos degraus da fila 14, envolveu a instrumentação do próprio degrau e dos dois degraus adjacentes, nomeadamente os degraus das filas 13 e 15. Foi também necessário instrumentar as extremidades dos degraus das filas 8, 14, 18 e 28 para identificar os modos de vibração globais associados a movimentos dos pórticos de suporte dos degraus de bancada.

Na Figura 4.18 são identificados os degraus de bancada seleccionados para a realização da primeira fase de ensaios dinâmicos. Estes degraus correspondem às filas 8, 13, 14, 15, 18 e 28, localizados entre os alinhamentos 42 e 43. O degrau de bancada da fila 14 corresponde ao degrau de referência, o qual tem um vão de 8,22 m, medido entre os eixos das vigas dos pórticos de suporte.

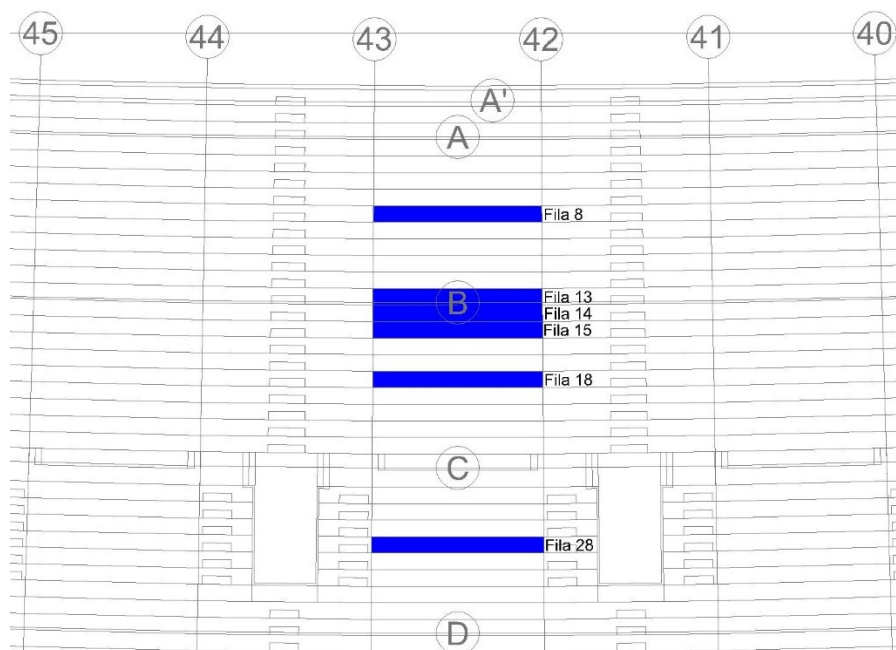


Figura 4.18 — Fase 1 de ensaios de vibração: identificação dos degraus da bancada sul.

O ensaio foi realizado por intermédio de uma técnica com pontos de referência fixos (Rodrigues, 2004), e com recurso a 16 transdutores, dos quais 5 foram utilizados como referência em posição fixa, e 11 que se foram movimentando de forma agrupada entre as sucessivas configurações de medição.

Nas Figura 4.19 a Figura 4.22, apresentam-se as posições dos acelerómetros durante a realização do ensaio, identificando-se a vermelho os acelerómetros de referência fixos e a azul os acelerómetros móveis para as quatro configurações de medição.

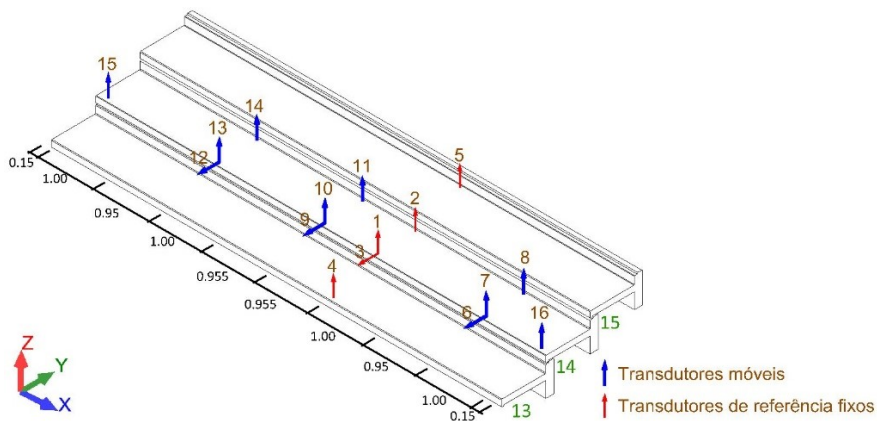


Figura 4.19 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 1.

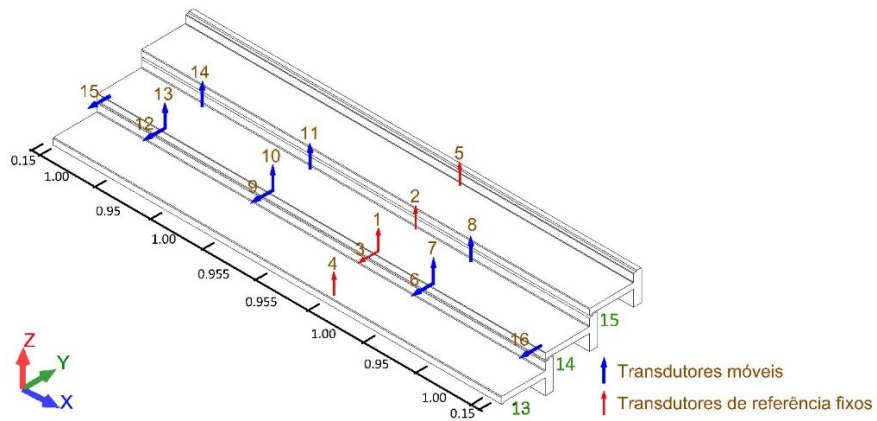


Figura 4.20 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 2.

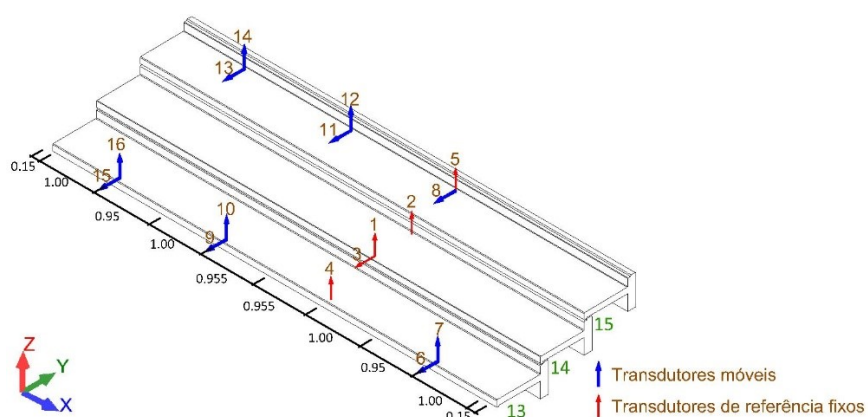


Figura 4.21 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 3.

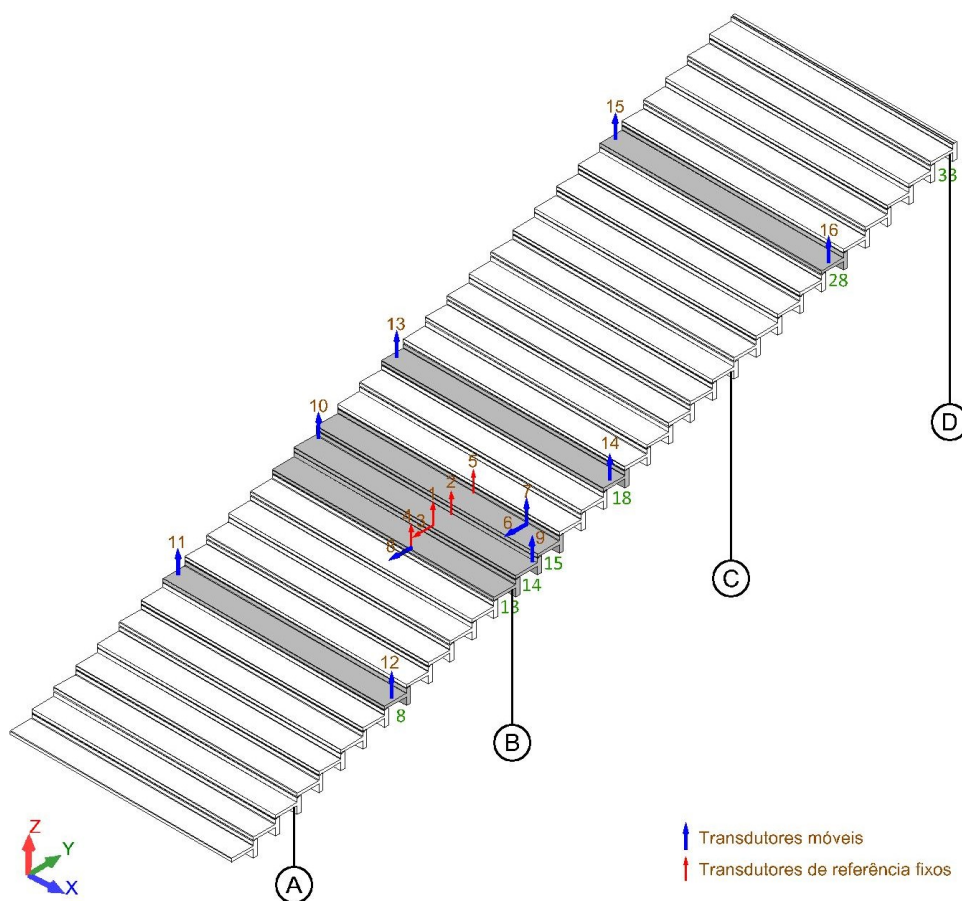



Figura 4.22 — Fase 1 do ensaio de vibração: configuração experimental 4.

As acelerações foram medidas na direção vertical (z) e na direção transversal (y). Foram instrumentadas as extremidades dos degraus das filas 8, 14, 18 e 28 na direção vertical, de modo a caracterizar as propriedades modais de carácter global associados à estrutura de suporte dos degraus

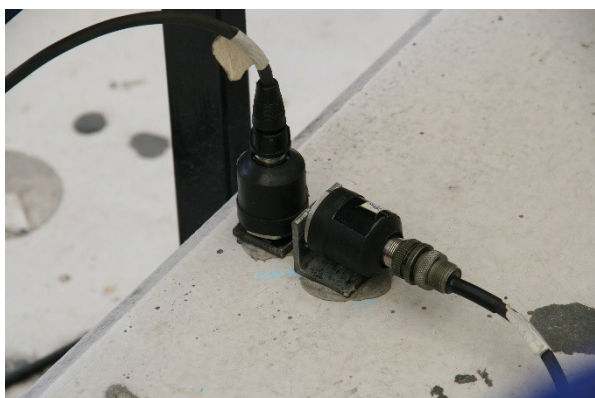
de bancada. Foram instrumentados os degraus 13, 14 e 15, nas direções vertical e transversal, para caracterizar os efeitos dinâmicos de carácter local associados aos próprios degraus de bancada.

Os transdutores utilizados na medição das acelerações verticais e transversais foram acelerómetros piezoelétricos, modelo 393B12 da marca PCB, cujas principais características constam do Quadro 4.1.

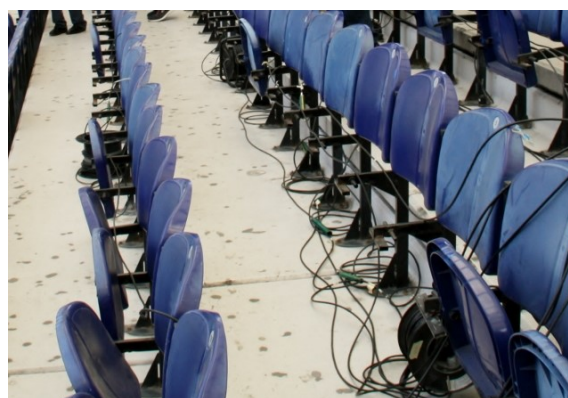
Quadro 4.1 – Características técnicas dos acelerómetros piezoelétricos.

Acelerómetro	
Marca/modelo	PCB 393B12
Resolução (μg)	8
Sensibilidade (mV/g)	1000
Gama de medição (g)	$\pm 0,5$
Gama de frequências (Hz)	0,15 a 1000
Dimensões (mm) (diâmetro x altura)	30,2 x 55,6
Tipo / funcionamento	Cerâmico / Corte

A ligação dos acelerómetros aos degraus de bancada foi efetuada por intermédio de chapas e cantoneiras metálicas coladas à superfície de betão (Figura 4.23a). Nas zonas de ligação dos cabos dos acelerómetros com os cabos coaxiais das bobines, foram utilizados conetores tipo BNC protegidos com troços de mangueira plástica (Figura 4.23b) de modo a minimizar eventuais interferências elétricas.



a)




b)

Figura 4.23 — Fase 1 de ensaio dinâmico: a) fixação de acelerómetros à estrutura; b) Cabos ordenados e ligações entre cabos protegidas.

A aquisição de dados foi realizada através do sistema NI cDAQ-9172 da National Instruments, com recurso a quatro módulos NI 9234 para acelerómetros do tipo IEPE. No Quadro 4.1 são apresentados as principais características técnicas dos módulos utilizados.

Quadro 4.2 – Características técnicas dos módulos NI 9234 para acelerómetros.

Módulo	
Modelo	NI 9234
Nº de canais simultâneos	4
Resolução (bit)	24
Frequência de amostragem por canal (Hz)	2048 a 51200
Gama de medição (V)	± 5
Condicionamento de sinal	Acelerómetros IEPE

O sistema de aquisição de dados e o computador portátil para a leitura e armazenamento dos dados, foram controlados com recurso ao software LabVIEW.

As séries temporais foram adquiridas com uma duração aproximada de 5 min, e com uma frequência de amostragem de 2048 Hz, posteriormente decimadas para uma frequência igual a 256 Hz. Na Figura 4.24 apresentam-se alguns pormenores do sistema de aquisição de dados e do computador portátil.



a)



b)

Figura 4.24 — Fase 1 do ensaio dinâmico: a) sistema de aquisição de dados; b) computador portátil.

O ensaio envolveu o recurso a uma excitação externa, a qual foi assegurada por ação de um grupo de pessoas sobre a estrutura, em virtude dos níveis de aceleração das bancadas em condições ambientais serem reduzidos (Figura 4.25). Esta técnica consistiu na execução de saltos de forma aleatória em

termos temporais e sobre os degraus instrumentados e também nos degraus imediatamente acima e abaixo dos degraus instrumentados. Foram também realizadas medições com os indivíduos a caminhar de forma aleatória. Através do recurso a esta técnica foi possível obter importantes melhorias ao nível da relação sinal-ruído e, por conseguinte, aumentar a coerência entre sinais medidos.



Figura 4.25 — Fase 1 do ensaio de vibração: excitação forçada dos degraus de bancada através da ação de pessoas.

Na Figura 4.26 ilustra-se a interface gráfica do programa LabView de aquisição de dados

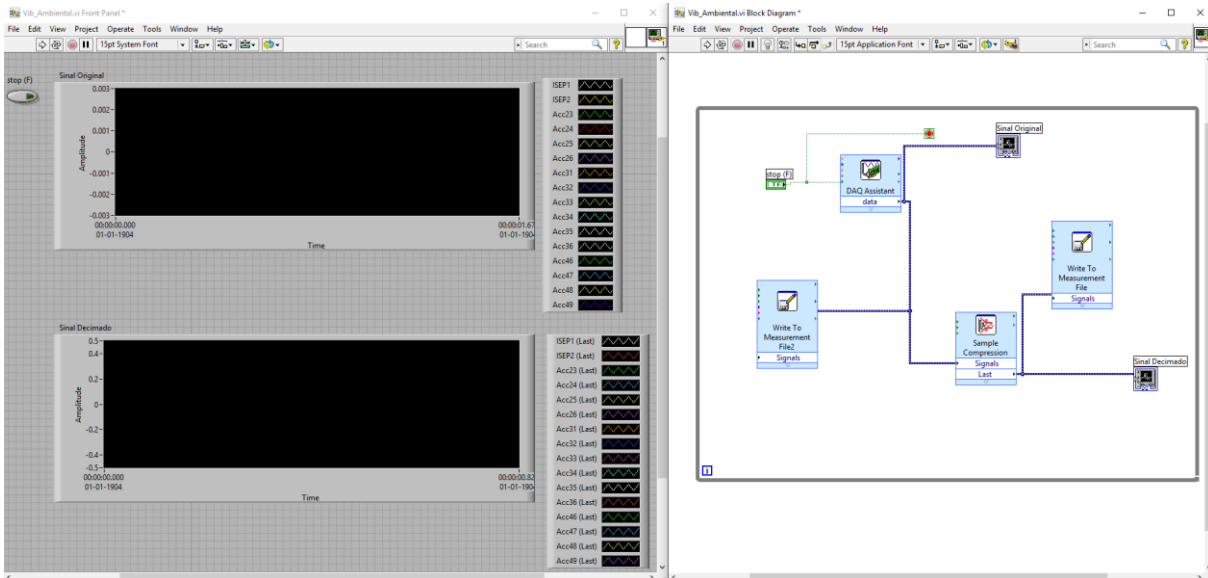


Figura 4.26 — Fase 1 do ensaio de vibração: interface Gráfica do programa LabView.

4.3.2.2 Identificação dos parâmetros modais

A identificação dos parâmetros modais foi realizada com recurso ao programa comercial ARTeMIS (SVS, 2011), por aplicação da versão melhorada de decomposição no domínio da frequência (EFDD) (Magalhães, 2003). Este método é baseado na análise dos valores singulares da matriz dos espectros de resposta no domínio da frequência. Para o seu cálculo, as séries temporais foram divididas em blocos de 8 s de duração, o que conduziu a uma resolução em frequência, Δf , igual a 0,125 Hz, considerando um período de amostragem de 0,00048828 s. Os espectros de resposta foram analisados num intervalo compreendido entre 0 Hz e 128 Hz (frequência de Nyquist).

Na Figura 4.27 apresentam-se as curvas dos valores singulares das funções densidade espectral de potência obtidas para todas as configurações experimentais por aplicação do método EFDD. A identificação das frequências mais relevantes pode ser realizada através da avaliação das abcissas em correspondência com os picos da curva do primeiro valor singular.

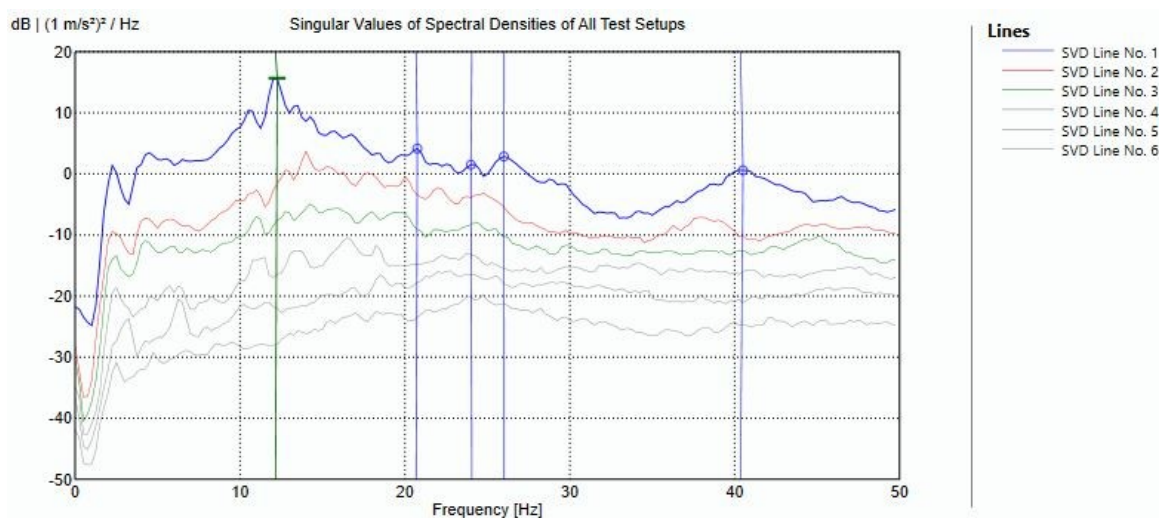


Figura 4.27 — Método EFDD (Fase 1): seleção de picos das funções dos valores singulares.

A estimativa das frequências e dos coeficientes de amortecimento é realizada após a seleção dos picos e por aplicação da transformada inversa de Fourier (IFFT), passando para o domínio do tempo a porção dos espectros das respostas junto aos picos das frequências em análise. A porção do espectro (ou número de pontos da IFFT) é determinada com recurso ao parâmetro MAC, que mede a correlação entre configurações modais, ou seja, entre o primeiro vetor singular e os restantes vetores singulares associados às frequências em torno do pico da frequência selecionada.

A estimativa dos coeficientes de amortecimento é obtida a partir das funções de auto-correlação resultantes da aplicação da transformada inversa de Fourier (IFFT) a cada um dos picos das frequências selecionadas, e por aplicação das Expressões (2.17) e (2.18).

Na Figura 4.28 apresenta-se a seleção de picos com identificação a vermelho do troço do 1º valor singular associado a um parâmetro MAC igual a 0,98, para o 1º modo de vibração da configuração de medição 1. Apresentam-se também as funções de auto-correlação e o decremento logarítmico que permitiu a identificação do respetivo coeficiente de amortecimento. A análise da configuração experimental 1 é apenas uma parte do conjunto das análises realizadas e que compreendeu quatro configurações de medição.

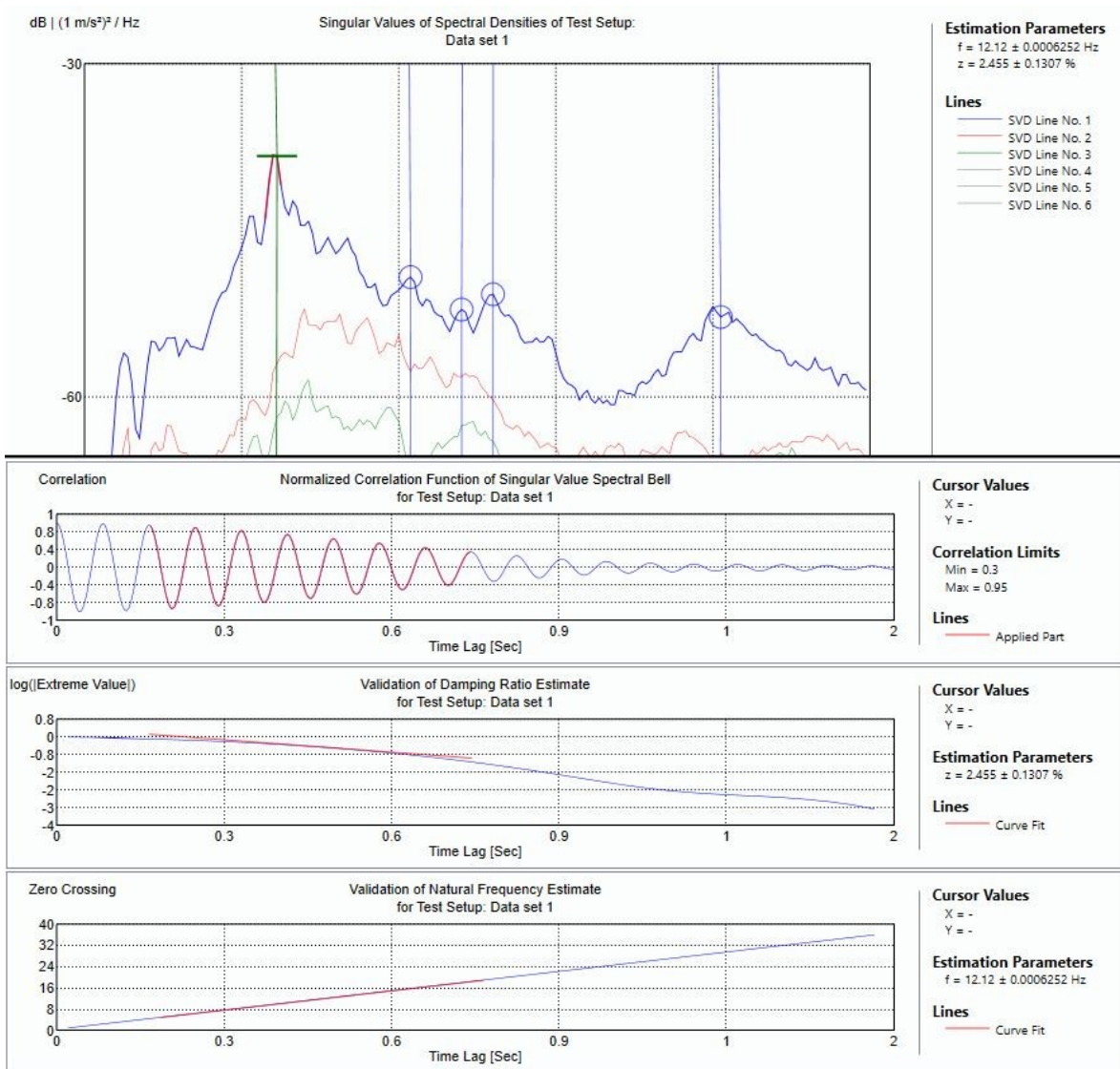


Figura 4.28 — Método EFDD (Fase 1): estimativa da frequência e do coeficiente de amortecimento do 1º modo de vibração.

O método EFDD permite seleccionar uma parte da função de auto-correlação, assinalada a vermelho na Figura 4.28, de modo a evitar zonas em que o sinal apresenta ruído, o qual poderá influenciar negativamente a avaliação do coeficiente de amortecimento da estrutura com base no decremento logarítmico da função.

Por fim, o programa comercial ARTeMIS (SVS, 2011) calcula a média das frequências naturais e dos coeficientes de amortecimento, correspondente ao conjunto de valores provenientes dos cálculos parcelares realizados para cada uma das quatro configurações de medição analisadas. É de salientar que estes cálculos foram depois realizados para cada um dos picos seleccionados, em correspondência com os vários modos de vibração.

Na Figura 4.29 apresentam-se as curvas dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros de todas as configurações experimentais obtidas por aplicação do método EFDD. A identificação das frequências mais relevantes pode ser realizada através da avaliação das abcissas em correspondência com alguns dos picos da curva do primeiro valor singular.

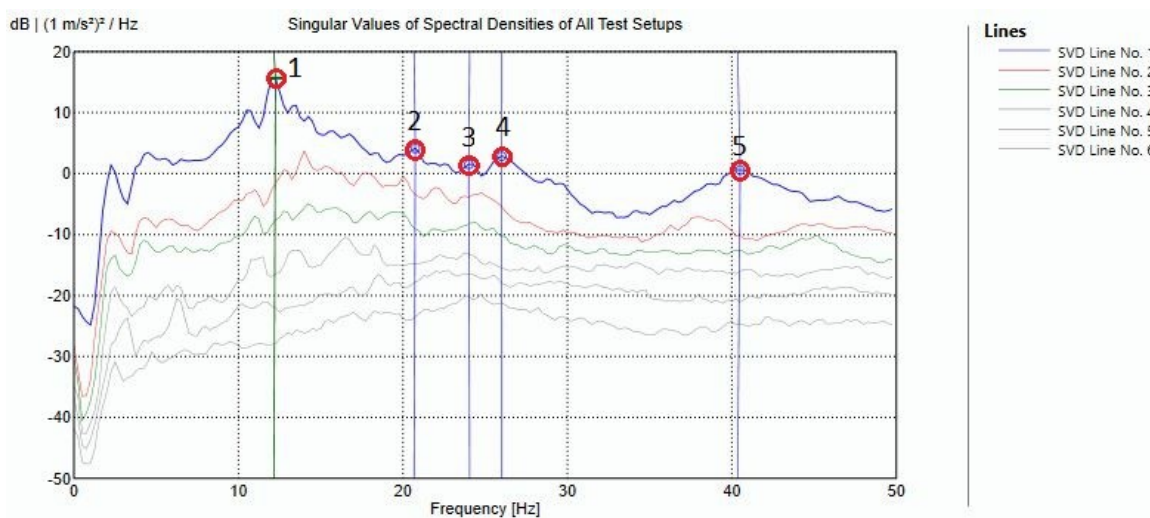


Figura 4.29 — Método EFDD (Fase 1): valores singulares médios e normalizados das matrizes dos espectros.

Foram identificados 5 modos de vibração locais associados aos degraus de bancada. Os modos 1, 3, 4 e 5 foram identificados na curva dos primeiros valores singulares e envolveram sobretudo movimentos dos degraus na direção vertical.

Na Figura 4.29 observam-se mais picos para além dos assinalados, alguns desses associados a modos de vibração da estrutura de suporte dos degraus de bancada, como é o caso dos picos associados às frequências de 2,25 Hz, 4,5 Hz e 11 Hz.

O principal objetivo deste estudo é a identificação dos modos locais dos degraus de bancada, para os quais são negligenciáveis os movimentos associados à estrutura de suporte dos degraus.

No Quadro 4.3 apresentam-se os valores médios das frequências naturais (f_i) e dos coeficientes de amortecimento (ξ) obtidos por aplicação do método EFDD, com recurso ao programa comercial ARTeMIS. São indicados os valores dos desvios-padrão relativos às frequências e aos coeficientes de amortecimentos dos modos selecionados. Apresentam-se também os valores das frequências naturais (f_i^*) e dos coeficientes de amortecimento (ξ^*) obtidos nos ensaios realizados em laboratório aos degraus de bancada, pelo VIBEST, da FEUP, em fevereiro de 2004 (Caetano et al., 2004).

Quadro 4.3 – Método EFDD (Fase 1): parâmetros modais.

Modo	f_i [Hz]	f_i^* [Hz]	σ_{f_i} [Hz]	ξ [%]	ξ^* [%]	σ_ξ [%]	Tipo de Modo
1	12,15	9,15	0,056	2,53	2,55	0,077	Flexão
2	20,68		0,114	1,36		0,394	Torção
3	24,06		0,067	1,26		0,285	Torção
4	26,01		0,272	1,26		0,301	Torção
5	40,35		0,304	1,11		0,187	Flexão

Da análise dos valores dos coeficientes indicados no quadro, constata-se existir uma tendência de diminuição dos valores dos coeficientes de amortecimento com o aumento dos valores das frequências de vibração, e sobretudo dos modos 1 a 3. A partir do modo 3 a tendência dos valores dos coeficientes de amortecimento é de estabilizar. A comparação dos valores da frequência do 1º modo de vibração obtidos no ensaio dinâmico (f_i) e num ensaio realizado em laboratório (f_i^*), pelo VIBEST em fevereiro de 2004, evidencia diferenças significativas, na ordem dos 2 - 3 Hz, e que possivelmente estarão relacionados com a incapacidade do modelo laboratorial reproduzir adequadamente as condições de fronteira e de ligação entre os degraus de bancada. Relativamente aos coeficientes de amortecimento as estimativas foram próximas, com um intervalo de variação situado entre 1 e 3 %.

Na Figura 4.30 são ilustradas as configurações modais associadas a cada um dos 5 modos identificados. A análise das configurações permite identificar modos de vibração locais que envolvem movimentos de flexão e de torção dos degraus de bancada com muito boa definição. Relativamente aos 5 modos detetados verifica-se que a interferência dos movimentos da estrutura de suporte dos degraus de bancada é reduzida.

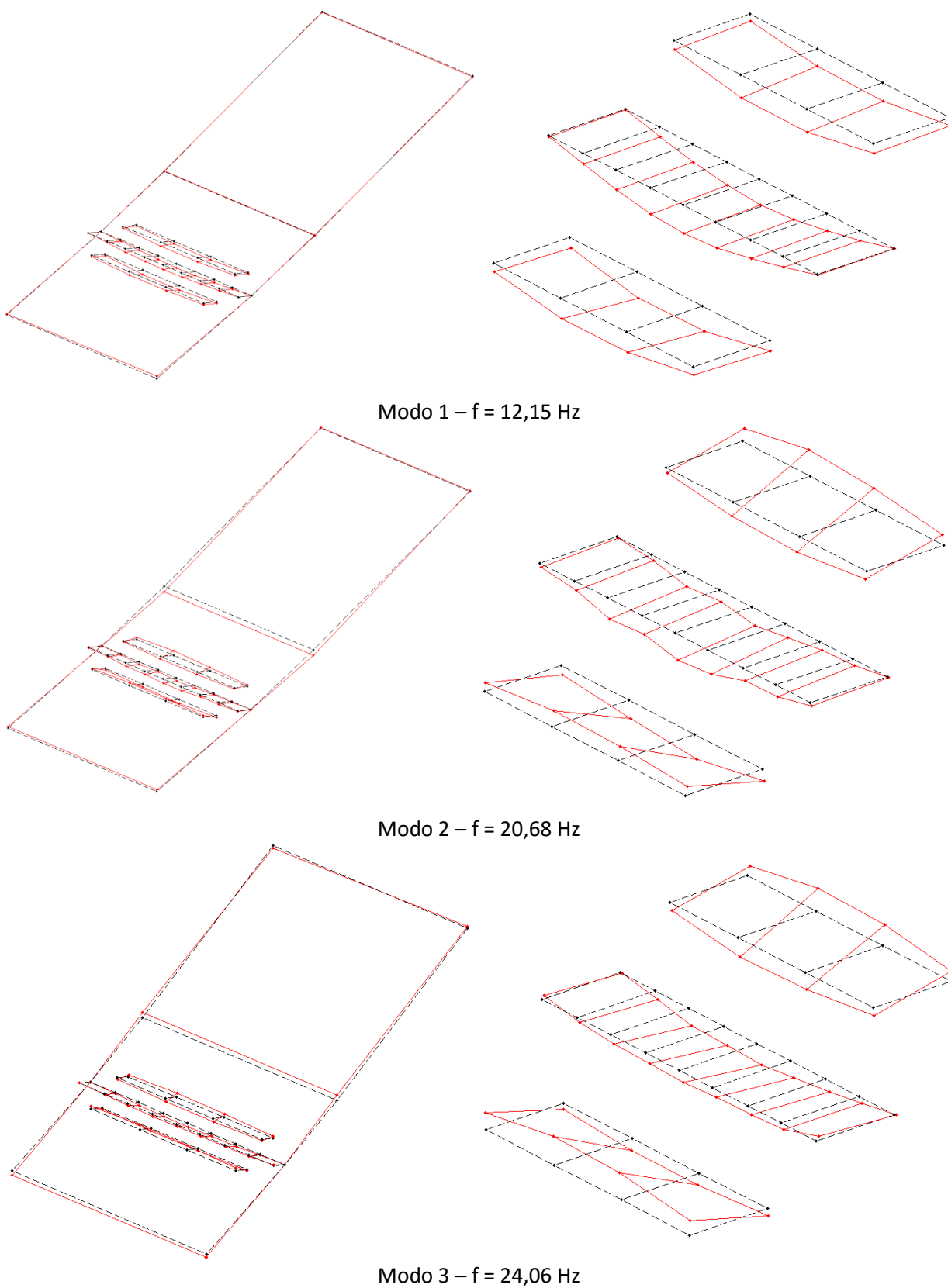


Figura 4.30 — Fase 1: modos de vibração dos degraus de bancada obtidos por via experimental.

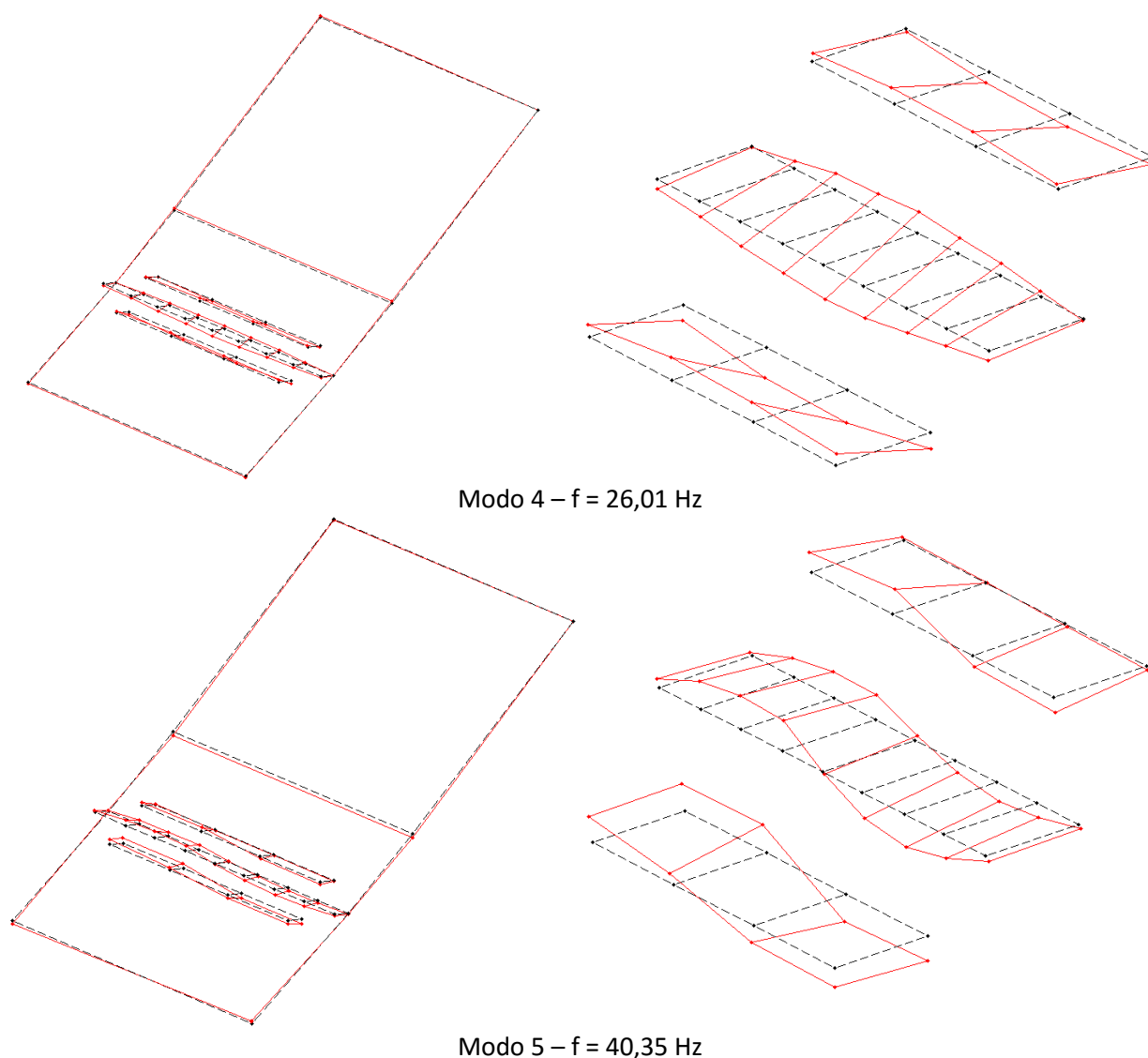


Figura 4.30 (Continuação) — Fase 1: modos de vibração dos degraus de bancada obtidos por via experimental.

Na Figura 4.31, são apresentadas as componentes modais através de coordenadas polares por meio de um diagrama de Argand, dos cinco modos de vibração experimentais identificados. No diagrama representa-se a amplitude e a fase normalizadas de cada componente dos vetores modais.

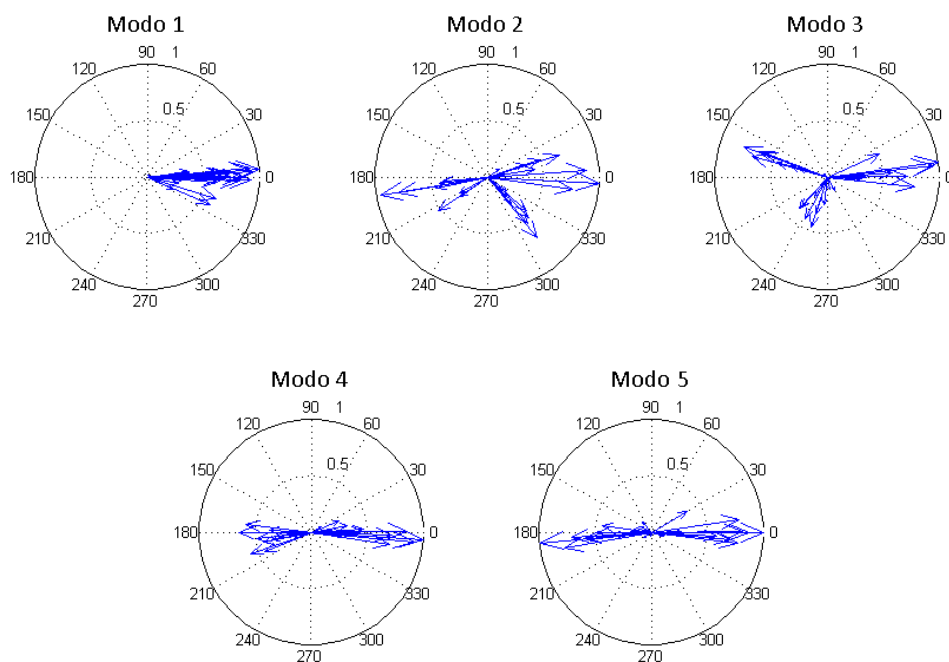


Figura 4.31 — Método EFDD (Fase 1): diagramas de Argand das componentes dos modos de vibração obtidos por via experimental.

A análise dos diagramas permite constatar que a maioria das componentes modais têm um ângulo de fase próximo de 0° e 180° , demonstrando-se assim que os modos de vibração identificados são reais, e por isso apresentam um amortecimento do tipo proporcional clássico (Ribeiro, 2012).

Os modos de vibração com componentes com ângulos de fase maioritariamente distintos de 0° e 180° são complexos. Estas componentes são visíveis sobretudo para as frequências de 20,68 Hz e 24,06 Hz (modos 2 e 3).

Na Figura 4.32 apresentam-se os valores da função de auto-MAC dos modos de vibração experimentais identificados na fase 1 e obtidos por aplicação do método EFDD.

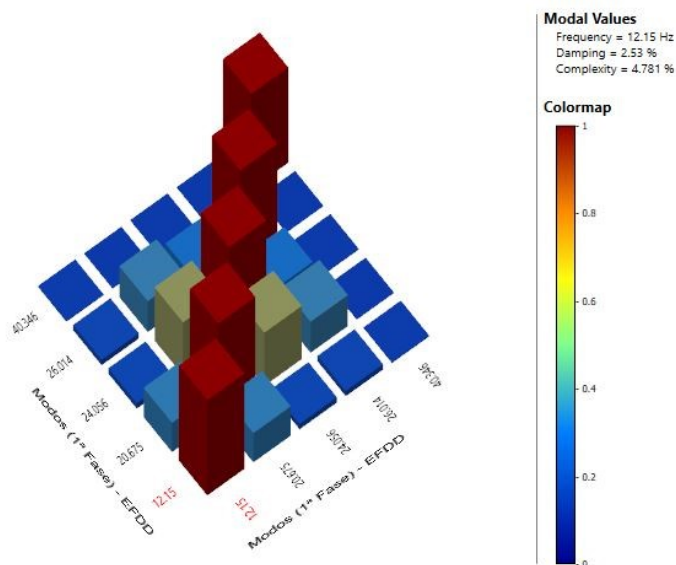


Figura 4.32 — Fase 1: matriz de auto-MAC entre os modos de vibração experimentais.

Observando a matriz constata-se um certo grau de acoplamento ($MAC=0,56$) entre os modos 2 e 3. No entanto, nos restantes casos, pode-se concluir que não existem correlações significativas entre modos, o que se traduz num desacoplamento entre modos de vibração experimental identificados.

O acoplamento entre os modos 2 e 3 resulta dos modos serem praticamente iguais, com exceção do movimento do degrau 14 que é de flexão transversal no caso do modo 2, e de flexão longitudinal, no caso do modo 3.

4.3.3 Fase 2

4.3.3.1 Descrição

A fase 2 dos ensaios dinâmicos envolveu a medição das respostas dinâmicas em 3 pontos pertencentes a 10 degraus das bancadas norte e sul. Na Figura 4.17a e na Figura 4.17b são identificados e numerados todos os degraus de bancada seleccionados para a realização da segunda fase dos ensaios.

O posicionamento dos acelerómetros foi definido de modo a evitar nodos dos modos de vibração de flexão na direção vertical. Além disso procurou-se incluir o ponto onde o 1º modo de flexão tem a maior ordenada modal, ou seja, a meio vão do degrau, para além de dois pontos que viabilizassem a identificação de outros modos de vibração, nomeadamente o segundo modo de flexão.

Na Figura 4.33 está representada a disposição dos acelerómetros utilizada no ensaio de cada um dos 10 degraus de bancada, dos quais 5 estão na bancada na bancada norte e 5 na bancada sul. A posição do acelerómetro 1 corresponde ao meio vão do degrau de bancada, e a posição dos acelerómetros 2 e 3 corresponde à posição dos acelerómetros 7 e 8 da configuração experimental 2 da fase 1 do ensaio.

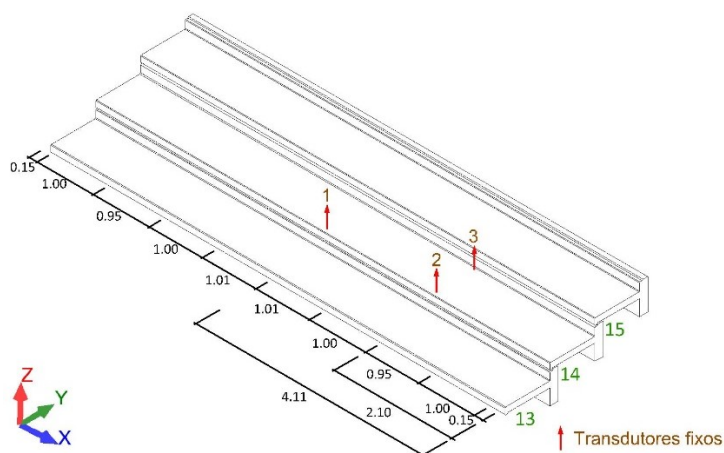


Figura 4.33 — Fase 2: configuração de medição.

Em todos os ensaios as acelerações foram medidas apenas na direção vertical. A ligação dos acelerómetros aos degraus de bancada foi efetuada por intermédio de chapas e cantoneiras metálicas coladas à superfície de betão. O posicionamento dos acelerómetros é ilustrado na Figura 4.34.

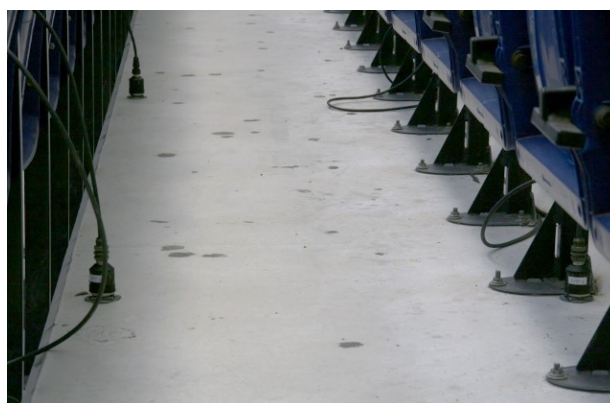



Figura 4.34 — Fase 2: posicionamento dos acelerómetros.

A aquisição de dados foi realizada através do sistema NI cDAQ-9172 da National Instruments, com base no software LabView e recurso a um módulo NI 9233 para acelerómetros do tipo IEPE. No Quadro 4.4 são apresentados as principais características técnicas do módulo utilizado.

Quadro 4.4 – Características técnicas dos módulos NI 9233 para acelerómetros.

Módulo	
Modelo	NI 9233
Nº de canais simultâneos	4
Resolução (bit)	24
Frequência de amostragem por canal (Hz)	2000 a 50000
Gama de medição (V)	± 5
Condicionamento de sinal	Acelerómetros IEPE

As séries temporais têm a duração aproximada de 5 min, e foram adquiridas com uma frequência de amostragem de 2000 Hz, posteriormente decimadas para uma frequência igual a 250 Hz. Na Figura 4.35 apresentam-se a disposição do sistema de aquisição e do computador portátil colocado sobre um degrau vizinho.

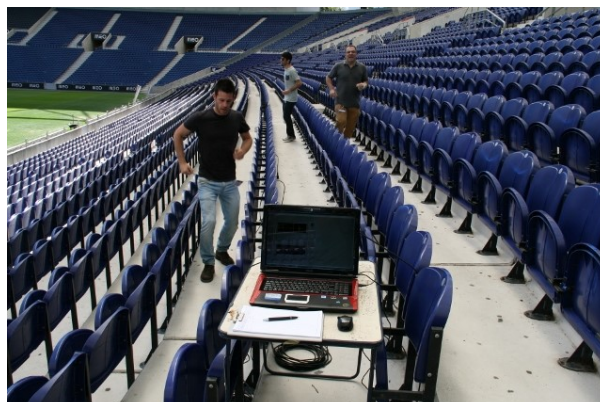


Figura 4.35 — Fase 2: excitação forçada dos degraus de bancada através da ação de pessoas e sistema de aquisição de dados.

Para a realização do ensaio foi necessário recorrer a uma excitação externa, a qual foi assegurada pela ação de três pessoas sobre a estrutura, em virtude dos níveis de aceleração dos degraus de bancada em condições ambientais serem reduzidos. Esta técnica envolveu a execução de saltos e caminhada de forma aleatória ao longo de 5 min com base em indivíduos posicionados no degrau instrumentado, na fila 14, e também nos degraus imediatamente acima e abaixo do degrau instrumentado.

Para a determinação dos coeficientes de amortecimento dos degraus de bancada da fila 14, foram realizados ensaios com saltos impulsivos espaçados no tempo ao longo de aproximadamente 1 min (Figura 4.36).

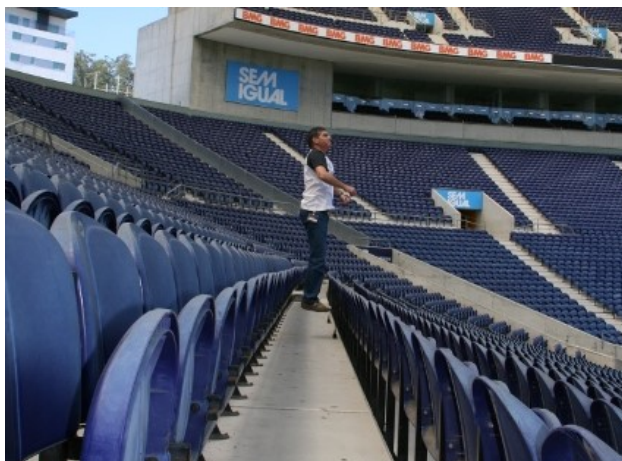


Figura 4.36 — Fase 2: excitação forçada do degrau de bancada com um indivíduo para avaliação do coeficiente de amortecimento.

4.3.3.2 Identificação dos parâmetros modais

A – Frequências e modos de vibração

Na fase 2 do ensaio a técnica de identificação dos parâmetros modais foi idêntica à utilizada na fase 1 (vêr Secção 4.3.2.2).

No entanto, como na aquisição de dados foi utilizado um módulo com características distintas do módulo utilizado na fase 1 do ensaio, importa referir que na fase 2, as séries temporais foram divididas em blocos de 8 s de duração, o que conduziu a uma resolução em frequência, Δf , igual a 0,125 Hz, considerando um período de amostragem de 0,0005 s. Os espectros de resposta foram analisados num intervalo compreendido entre 0 Hz e 125 Hz (frequência de Nyquist)

Na Figura 4.37 apresentam-se as curvas dos valores singulares das funções densidade espectral de potência para cada um dos degraus ensaiados (1 a 10). Apenas se encontram associados os modos 1 e 5, correspondentes aos 1º e 2º modos de flexão vertical do degrau 14.

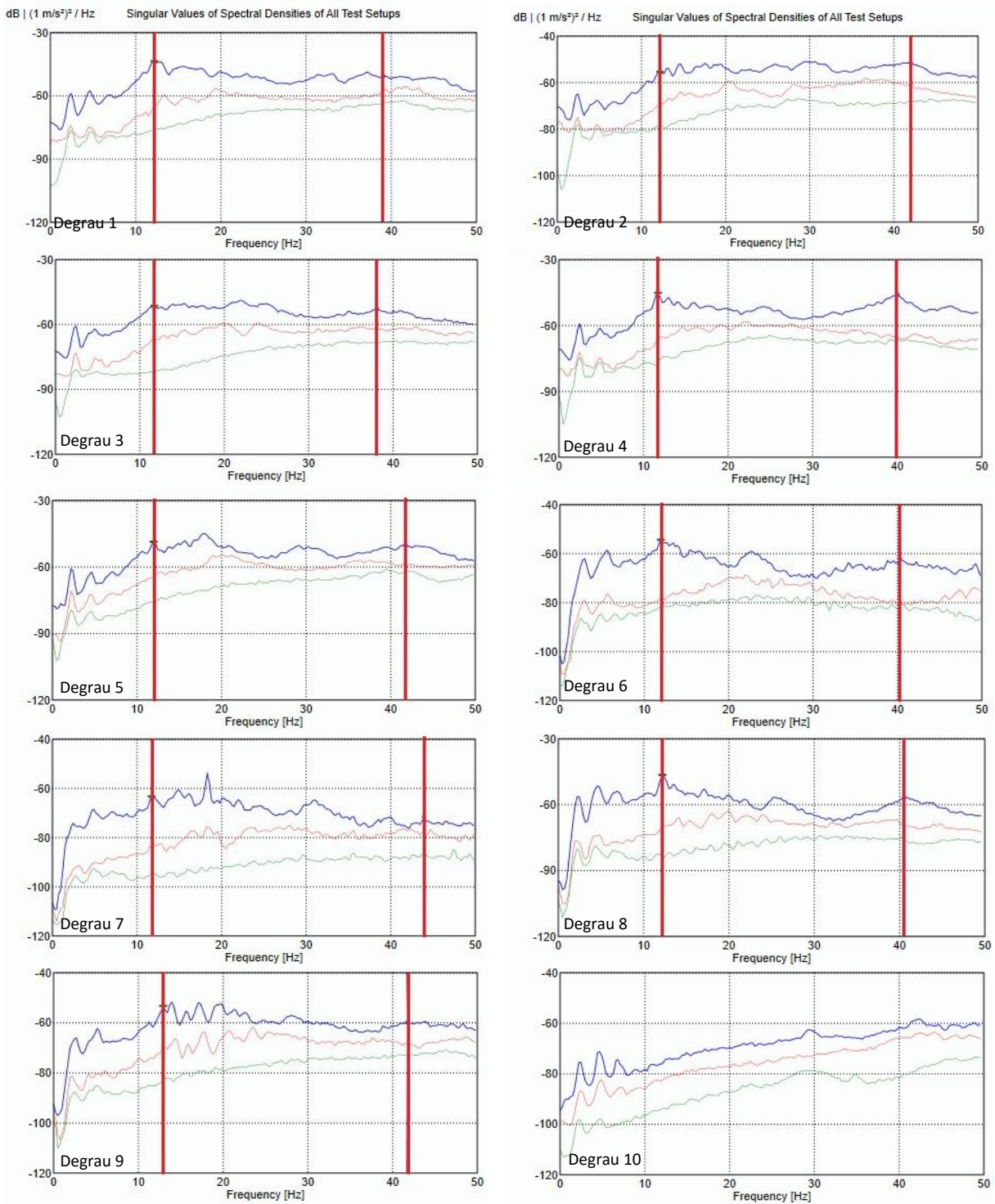


Figura 4.37 — Método EFDD (Fase 2): seleção de picos das funções de valores singulares.

Os valores das frequências de vibração dos modos 1 e 5 têm uma ordem de grandeza muito semelhante entre os diversos degraus. A variabilidade dos valores das frequências do modo 1 é inferior à variação registrada para o modo 5.

A curva de valores singulares obtida para o degrau 10 apresenta uma configuração diferente dos restantes degraus de bancada ensaiados. Este degrau está apoiado em paredes localizadas na sua parte inferior que lhe conferem uma maior rigidez, e por isso com configurações modais distintas dos restantes degraus. Por essa razão não foram assinaladas as frequências de vibração na Figura 4.37, assim como os coeficientes de amortecimento, como se verá mais adiante, na Figura 4.40.

No Quadro 4.5 apresentam-se os valores das frequências naturais e dos coeficientes de amortecimento obtidos por aplicação do método EFDD, para os degraus ensaiados (1 a 10). O desvio-padrão associado às frequências do modo 1 é inferior ao do modo 5. O mesmo sucede com o desvio-padrão dos coeficientes de amortecimento.

Quadro 4.5 – Método EFDD (Fase 2): parâmetros modais do 1º modo de flexão.

Degrau	f_i [Hz]		ξ [%]	
	1º modo	2º modo	1º modo	2º modo
1	12,12	38,97	2,12	0,73
2	12,13	41,97	2,29	0,48
3	11,60	38,08	2,49	0,94
4	11,67	39,92	2,01	1,44
5	11,97	41,63	2,86	1,05
6	11,97	40,24	1,62	0,67
7	11,96	43,90	4,26	0,58
8	12,15	40,35	2,53	1,11
9	12,95	41,64	2,80	0,69
10	-	-	-	-
Média/ σ	12,07/0,39	40,77/1,64	2,60/0,72	0,87/0,30

Na Figura 4.38 são apresentados os valores das frequências naturais dos modos 1 e 5 para os diversos degraus de bancada das bancadas norte e sul.

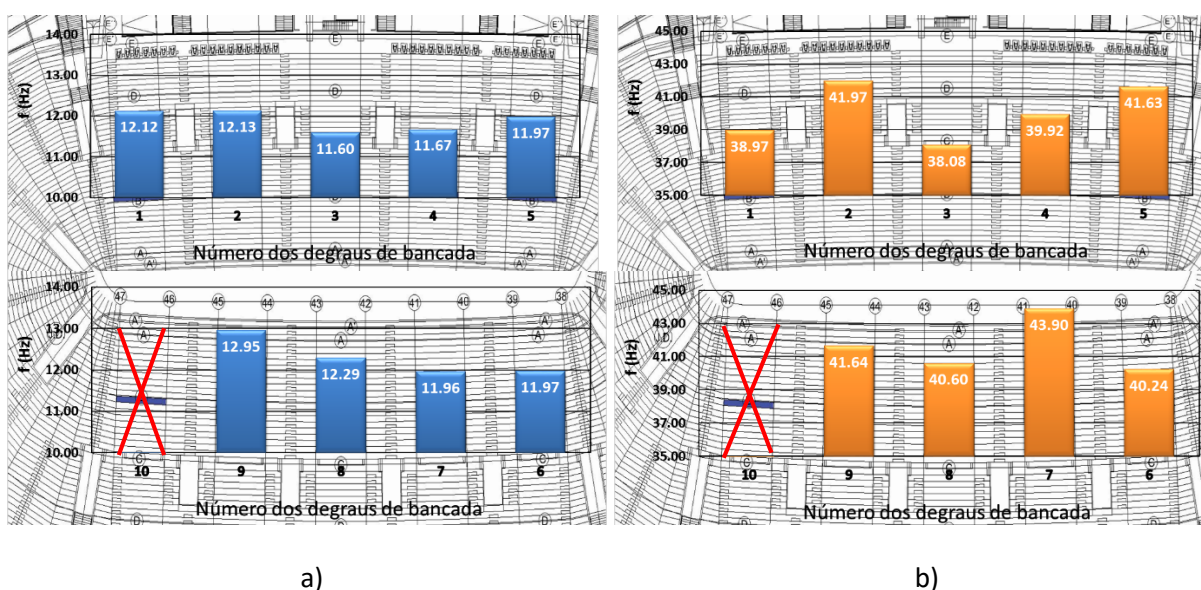


Figura 4.38 — Frequências naturais obtidas por via experimental (Fase 2): a) modo 1; b) modo 5.

Analisados os gráficos, verifica-se que as frequências do modo 1, tem um intervalo de variação de 1,35 Hz, comparativamente aos 5,82 Hz para o modo 5. Os degraus de bancada que apresentam valores das frequências do modo 1 mais elevados são os das extremidades da bancada norte. Por outro lado os valores das frequências do modo 1 dos degraus da bancada norte são inferiores aos registados nos degraus da bancada sul.

Relativamente às frequências do modo 2, apresentam uma maior variabilidade e aleatoriedade de distribuição comparativamente às frequências do modo 1.

B – Coeficientes de amortecimento

Os coeficientes de amortecimento foram determinados com base na aplicação do método do decremento logarítmico (Ribeiro, 2012). Este método é baseado na análise dos registos de acelerações em vibração livre devido à atuação de uma força impulsiva, devido a um salto pontual a meio vão do degrau da fila 14 dos 10 degraus selecionados das bancadas norte e sul do estádio. O método envolve a aplicação de um filtro do tipo passa-banda ao registo de acelerações, em torno da frequência do modo para o qual se pretende estimar o coeficiente de amortecimento, seguido do ajuste de uma função exponencial do tipo $a = C \cdot e^{-\xi\omega t}$ aos máximos do registo filtrado. Na função referida a é a aceleração, C é uma constante, ω é a frequência angular e ξ o coeficiente de amortecimento.

Na Figura 4.39 apresentam-se os registos das acelerações verticais em vibração devido a um salto impulsivo a meio vão de cada um dos degraus de bancada. Foram selecionadas duas zonas do registo em vibração livre após o evento, nomeadamente, a zona 1 e a zona 2, para as quais foi considerado um idêntico número de ciclos, variável entre 5 e 6, de degrau para degrau. Os saltos impulsivos foram realizados a meio vão dos degraus de bancada de modo a mobilizar sobretudo o 1º modo de vibração vertical (modo 1).

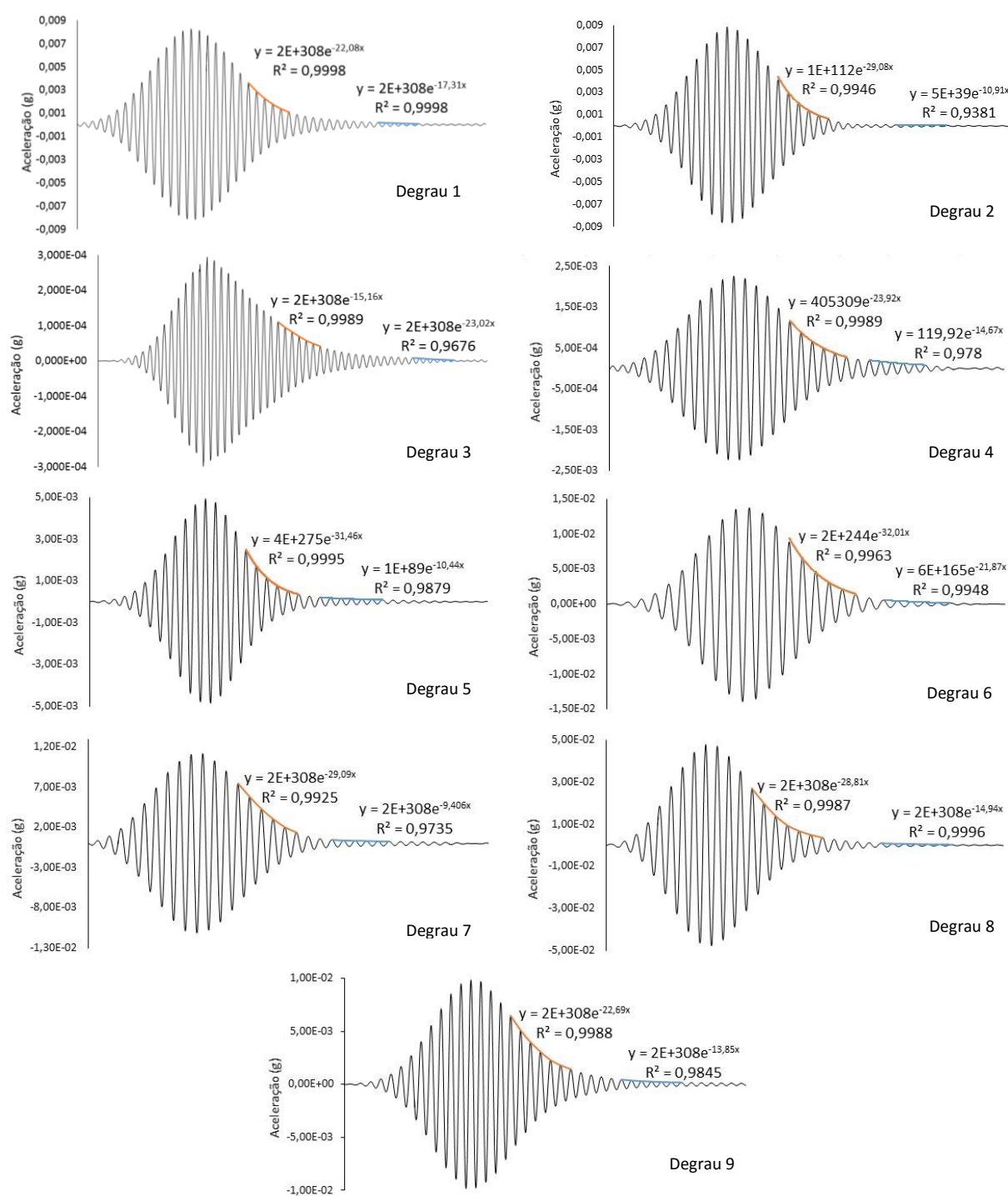


Figura 4.39 — Método do decremento logarítmico: registo de acelerações para salto impulsivo nos 10 degraus das bancadas norte e sul.

Os valores dos coeficientes de amortecimento obtidos por via experimental e por aplicação do método do decremento logarítmico, para os degraus de bancada ensaiados das bancadas norte e sul, apresentam-se na Figura 4.40. Os valores dos coeficientes de amortecimento obtidos foram

determinados com base no valor médio dos resultados obtidos a partir das acelerações medidas em três saltos impulsivos para cada um dos degraus. Para o degrau 10 não foram determinados os coeficientes de amortecimento pelas razões apresentadas na Secção 4.3.3.2-A.

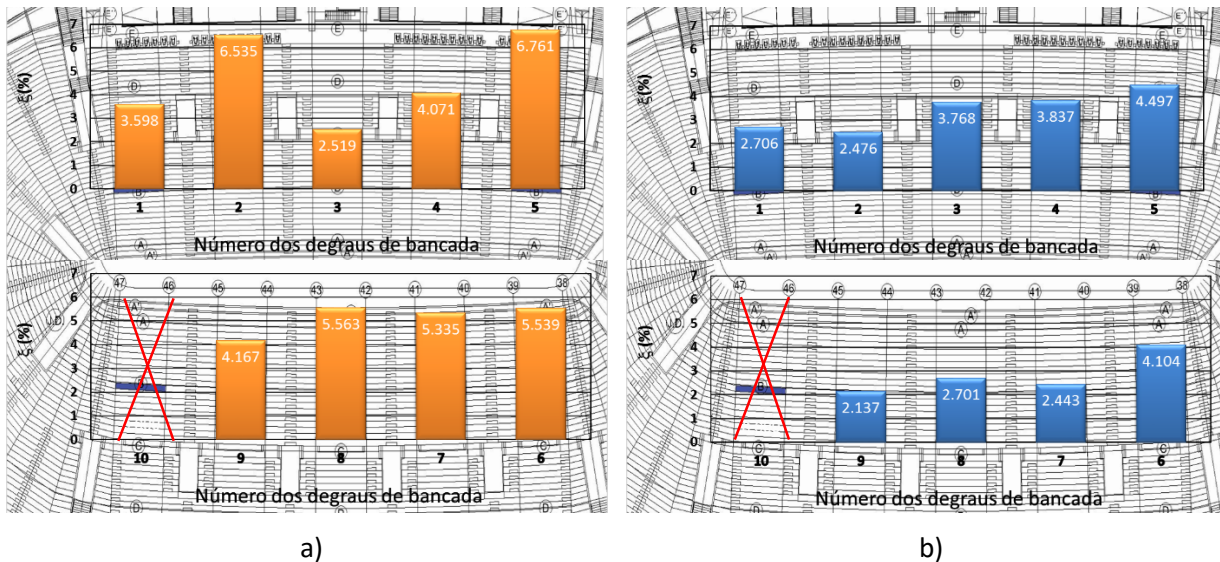


Figura 4.40 — Coeficientes de amortecimento obtidos por via experimental na bancada norte e sul:
a) pós-evento – Zona 1; b) pós-evento – Zona 2.

A observação dos resultados permite constatar que os coeficientes de amortecimento calculados para os degraus da bancada sul apresentam uma menor variabilidade comparativamente aos valores calculados para os degraus da bancada norte. Salienta-se que os coeficientes de amortecimento calculados considerando a zona 1 da resposta em vibração livre apresentam uma menor variação em comparação com os valores dos coeficientes de amortecimento calculados para a zona 2, tanto para os degraus da bancada norte como para os da bancada sul. Verifica-se ainda que, nos degraus 2 e 5 da bancada norte, os valores dos coeficientes de amortecimento obtidos para a Zona 1 são francamente superiores aos obtidos para os restantes degraus da bancada. Esta situação que está relacionada com fraca qualidade dos saltos realizados nos degraus da bancada norte, indicando uma possível interferência de outros modos vizinhos ao 1º modo de vibração.

Analisando os valores dos coeficientes de amortecimentos obtidos para os 4 degraus da bancada sul, constata-se que os valores calculados para a zona 1 apresenta uma variação que compreende o intervalo de [4,167 – 4,563] %, resultando num valor médio de 4,901 %. Relativamente aos valores dos coeficientes de amortecimento calculados considerando a 2, o intervalo de variação é de [2,137 – 4,104] %, resultando num valor médio de 2,846 %.

4.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO COM RECURSO A ULTRA-SONS

Os ensaios de caracterização do betão com recurso à técnica de ultra-sons é um ensaio não destrutivo que permite estimar o valor do módulo de elasticidade do betão. Este tipo de ensaio é uma alternativa a técnicas clássicas de determinação do módulo de elasticidade do betão baseadas na recolha de amostras, através da extração de carotes, e seu posterior ensaio em laboratório (Naik, *et al.*, 2004).

4.4.1 Descrição

O princípio de funcionamento que está na base do ensaio de ultra-sons consiste na determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas entre dois pontos de medida, nos quais estão colocados dois transdutores, um transmissor e outro recetor (Figura 4.41a). As ondas ultrassónicas produzidas pelo transmissor propagam-se através do elemento em betão em estudo sendo estas captadas pelo recetor, localizado no segundo ponto de medida do elemento, que converte as ondas em sinal elétrico, sendo então medido, por meio de um relógio eletrónico, o tempo de percurso do impulso vibratório (NP EN 12504-4, 2007).

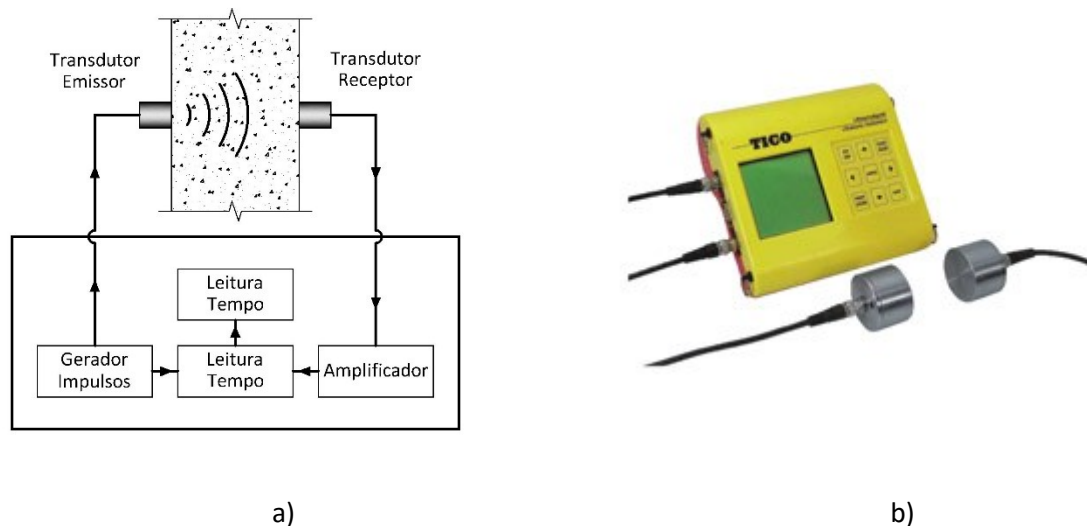


Figura 4.41 — Ensaio de ultra-sons do betão (adaptado de Naik, *et al.*, 2004): a) princípio de funcionamento; b) equipamento de medição de ultrassónica (marca PROTEC, modelo Tico).

A velocidade de propagação das ondas de compressão (V_p) é calculada de acordo com a Expressão (4.1), na qual t é o tempo despendido pela primeira onda a percorrer a distância entre os pontos de medição, e L a distância entre os dois pontos de medição, sendo estes valores registados no aparelho de medição.

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (4.1)$$

A aparelhagem é constituída por uma unidade central e dois transdutores, dos quais um é emissor e outro receptor. A unidade central incorpora um gerador de impulsos elétricos, um amplificador dos sinais recebidos, um dispositivo eletrónico de medição do tempo, que permite medir a duração entre a frente do impulso gerado pelo transmissor e a sua chegada ao recetor, e ainda um ecrã para visualização dos resultados (Figura 4.41b).

O ensaio de ultra-sons do betão pode ser realizado em três configurações distintas, em função do tipo de condição de transmissão das ondas: transmissão direta, transmissão semi-direta e a transmissão indireta (Figura 4.42).

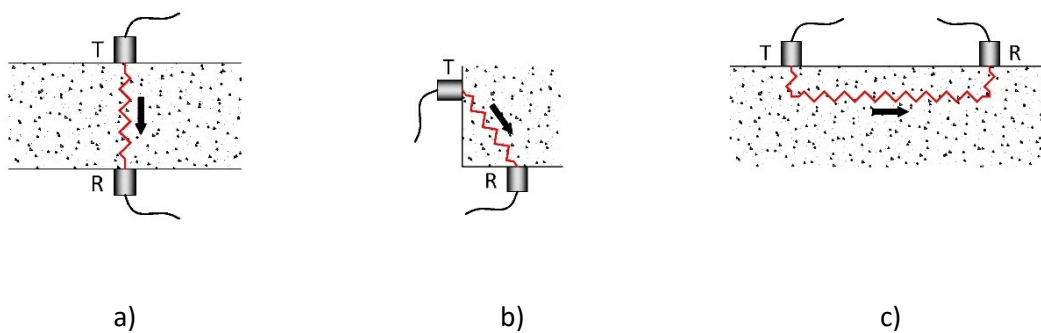


Figura 4.42 — Método de transmissão e receção de ultra-sons: a) direta; b) semi-direta; c) indireta.

A transmissão direta envolve a medição da velocidade de ultra-sons colocando os dois transdutores em faces opostas do elemento em estudo segundo o mesmo alinhamento (Figura 4.42a). Este tipo de transmissão é o mais recomendado pelo facto de se obter a máxima propagação de energia e da amplitude de sinal recebido. Na transmissão semi-direta os transdutores são posicionados em faces adjacentes do elemento em estudo e a uma distância próxima (Figura 4.42b). Este tipo de transmissão é utilizado quando há a necessidade de evitar zonas com elevada concentração de armaduras. Na transmissão indireta os transdutores são posicionados na mesma face do elemento nas situações em que é impossível utilizar a transmissão direta e semi-direta. A transmissão indireta é também utilizada na deteção da profundidade de fissuras nos elementos de betão (Figura 4.42c).

Na transmissão direta e semi-direta a velocidade de propagação de ultra-sons é calculada por aplicação da Expressão (4.1), enquanto que na transmissão indireta a velocidade de propagação de ultra-sons é calculada fazendo uma correlação entre velocidades obtidas a partir de uma série de medições a várias distâncias.

O módulo de elasticidade dinâmico do betão (E_d) pode ser diretamente correlacionado com a velocidade de propagação dos ultra-sons num meio elástico isotrópico de dimensões infinitas, através da seguinte expressão:

$$E_d = \rho v^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (4.2)$$

onde ρ é a densidade do betão, v é a velocidade de propagação de ultra-sons, ν é o coeficiente de Poisson dinâmico do betão. Embora na realidade os elementos de betão tenham dimensões finitas e sejam heterogêneos, a aplicação da Expressão (4.2) constitui uma boa aproximação da solução do problema desde que se garanta uma distância de percurso mínima de 100 mm, para dimensões de agregado do betão inferiores a 20 mm, ou uma distância de percurso mínima de 150 mm para dimensões do agregado do betão entre 20 mm e 40 mm (BS 1881, 1986).

Quando os valores da densidade do betão e o coeficiente de Poisson dinâmico do betão são conhecidos é possível utilizar a Expressão (4.2). Quando estes valores não são conhecidos, poderá realizar-se um teste dinâmico em laboratório, estabelecendo uma comparação entre a razão do módulo de elasticidade dinâmico do betão e a densidade do betão com a frequência de ressonância e a dimensão do elemento de testes. No entanto não é possível realizar estes testes em elementos estruturais fora do ambiente laboratorial o que condiciona a determinação dos valores destas propriedades.

Ainda assim é possível estabelecer uma relação empírica entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático do betão com base na velocidade de propagação de ultra-sons. No Quadro 4.6 apresentam-se os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos para elementos de betão fabricado com os tipos de agregados naturais mais comuns. A estimativa do módulo de elasticidade obtido a partir deste quadro tem um desvio-padrão de $\pm 10\%$.

Quadro 4.6 – Relação empírica entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico do betão com a velocidade de propagação de ultra-sons.

Velocidade de propagação de ultra-sons (km/s)	Módulo de Elasticidade do betão (MN/m ²)	
	Dinâmico	Estático
3,6	24000	13000
3,8	26000	15000
4,0	29000	18000
4,2	32000	22000
4,4	36000	27000
4,6	42000	34000
4,8	49000	43000
5,0	58000	52000

4.4.2 Aplicação

O ensaio de ultra-sons do betão foi realizado em 10 pares de pontos de medição de 4 degraus da bancada sul (Figura 4.43), mais precisamente na nervura dos degraus das filas 14 e 15 nos alinhamentos do degrau 7 e 8 identificados na Figura 4.17. Pretendia-se realizar ensaios a um conjunto mais alargado de degraus das bancadas norte e sul, no entanto tal não foi possível, uma vez que na bancada norte os degraus encontram-se a uma altura superior a 5 m em relação ao piso, o que obrigaria o recurso a equipamentos elevatórios com implicações no normal funcionamento do estádio. No caso dos degraus da bancada sul os alinhamentos dos degraus 6, 9 e 10 comportam tetos falsos que impedem o acesso à nervura vertical dos degraus do conjunto identificado na Figura 4.17. Nesta aplicação foi utilizado o equipamento da marca PROCEQ, modelo Tico (PROCEQ, 2016), e adotou-se a técnica de transmissão direta.

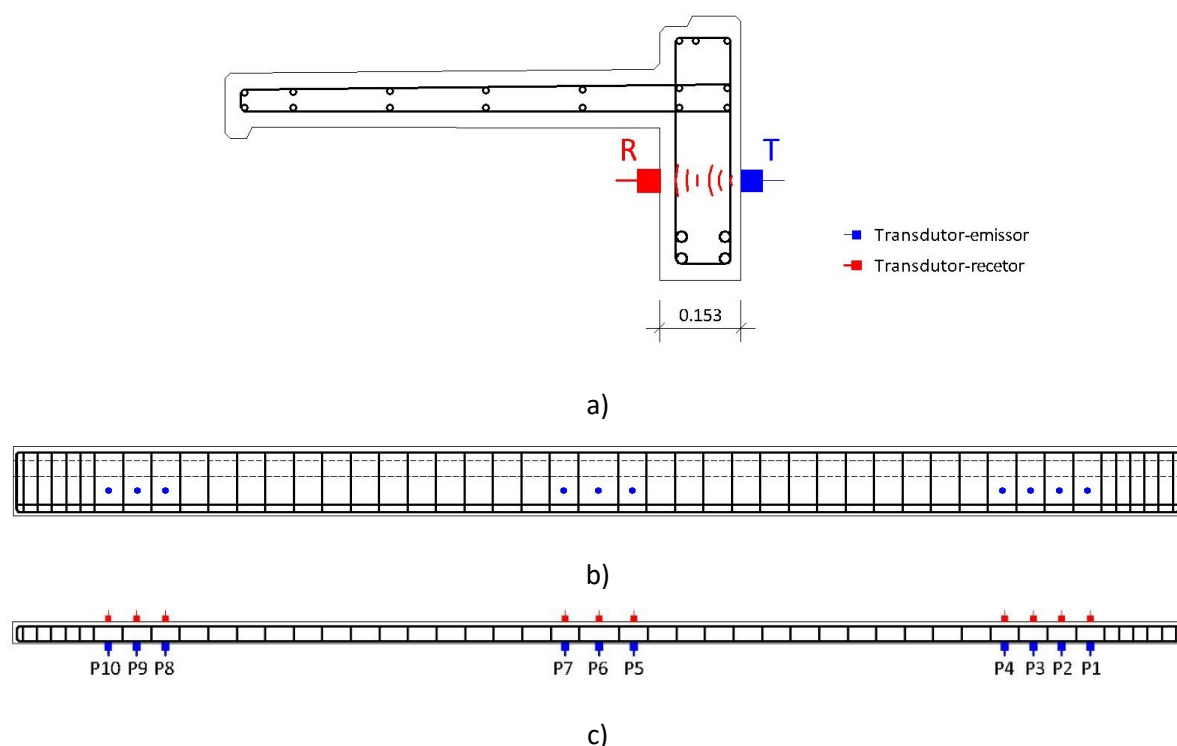


Figura 4.43 — Localização dos diferentes pontos de medida nos degraus das filas 14 e 15 nos alinhamentos dos degraus 7 e 8: a) corte transversal da nervura; b) alçado da nervura; c) corte longitudinal da nervura.

Na Figura 4.44a ilustra-se a execução do ensaio de ultra-sons na parede do degrau da fila 14 do alinhamento do degrau 8 identificado na Figura 4.17. O contacto dos transdutores com a superfície do betão condicionou o número e posição dos pontos de medição em virtude de existir uma elevada porosidade na superfície dos degraus selecionados para os ensaios, a qual é visível na Figura 4.44b. O contacto dos transdutores com a superfície do betão foi garantido pela aplicação de uma fina camada de gel de cabelo. A deteção das armaduras foi realizada por intermédio de sistema de deteção laser da marca HILTI, modelo Ferrosan PS200 (HILTI, 2016).



Figura 4.44 — Ensaio de ultra-sons do betão: a) posicionamento dos transdutores; b) identificação do posicionamento de armaduras.

4.4.3 Resultados

Na Figura 4.45 apresentam-se os valores dos tempos de propagação das ondas de compressão registadas nas 10 posições de medição (P1 a P10) para os 4 degraus ensaiados. Em cada posição foram realizadas 4 medições, perfazendo um total de 160 medições. Os tempos registados variam entre os 35,9 μ s na posição P1 do degrau da fila 14 do alinhamento do degrau 8, e 39,9 μ s na posição posição P10 do degrau da fila 14 do alinhamento do degrau 7. Em todos os degraus foi seguido o mesmo procedimento para a realização do ensaio. Na análise dos gráficos verifica-se que os tempos de propagação são mais elevados e dispersos nas filas 14 e 15 do alinhamento do degrau 7 comparativamente aos tempos obtidos para o alinhamento do degrau 8. Esta constatação está relacionada com o facto do betão dos degraus do alinhamento do degrau 7 apresentarem uma porosidade substancialmente mais elevada comparativamente ao betão dos degraus do alinhamento do degrau 8.

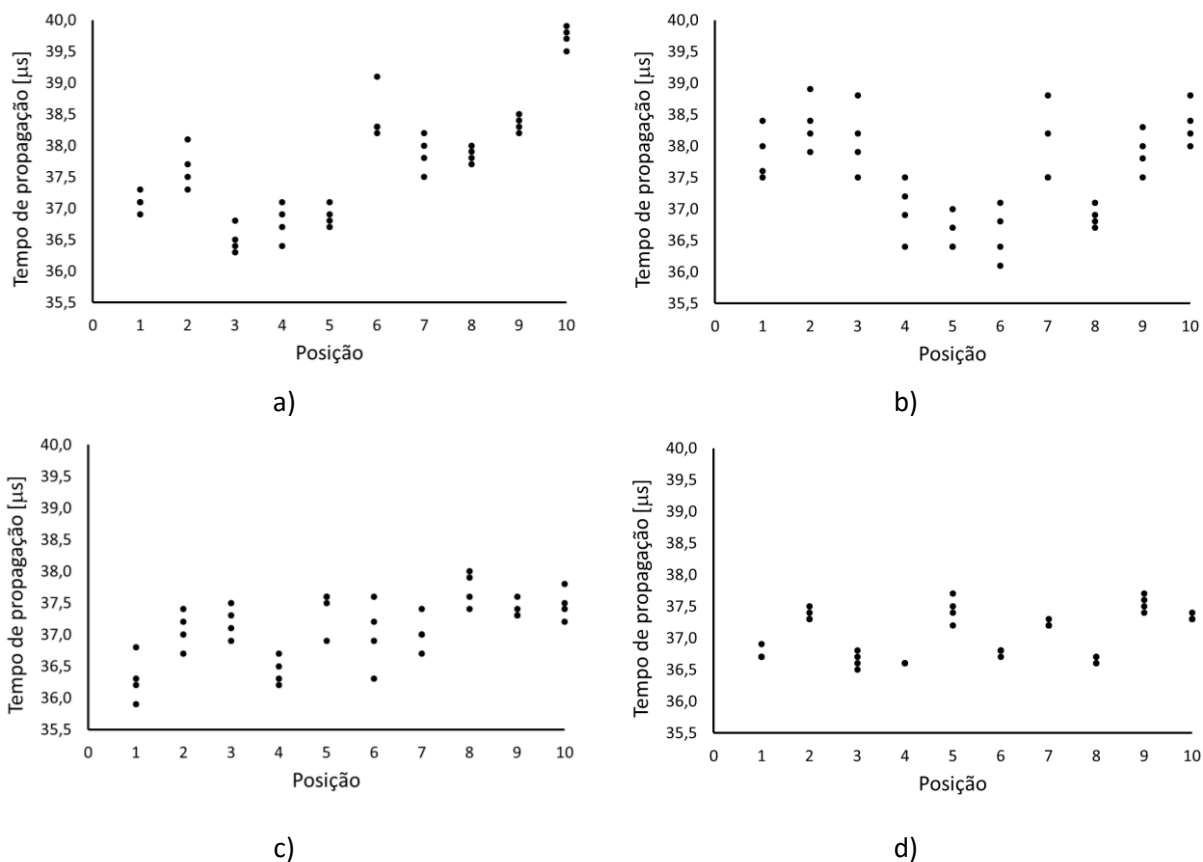


Figura 4.45 — Valores do tempo de propagação dos ultra-sons em diferentes localizações dos degraus da bancada sul: a) degrau da Fila 14 do alinhamento do degrau 7; b) degrau da Fila 15 do alinhamento do degrau 7; c) degrau da Fila 14 do alinhamento do degrau 8; d) degrau da Fila 15 do alinhamento do degrau 8.

O módulo de elasticidade dinâmico do betão foi estimado com base numa simulação estocástica realizada a partir de 10^4 amostras. Nesta simulação as variáveis são a largura (L) do elemento de betão e o tempo (t) de propagação de ultra-sons. A largura foi considerada igual a 0,153 m e o tempo variável entre 35,9 μs e 39,9 μs.

A partir da relação empírica indicada no Quadro 4.6, é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico do betão quando se desconhece a massa volúmica e o coeficiente de Poisson dinâmico do betão. No entanto, e como já foi referido na Secção 4.4.2, esta relação empírica tem uma incerteza de associada de $\pm 10\%$ na aproximação ao valor efetivo do módulo de elasticidade do betão.

Na Figura 4.46 representam-se as linhas de tendência polinomiais representativas dos valores apresentados no Quadro 4.6 e que permitem determinar o módulo de elasticidade dinâmico e estático

do betão. Com base nas fórmulas apresentadas estimaram-se os valores a partir da média aritmética dos valores obtidos em cada ponto de medição, e posteriormente o valor médio para os valores das velocidades de propagação obtidos nos vários pontos de medição.

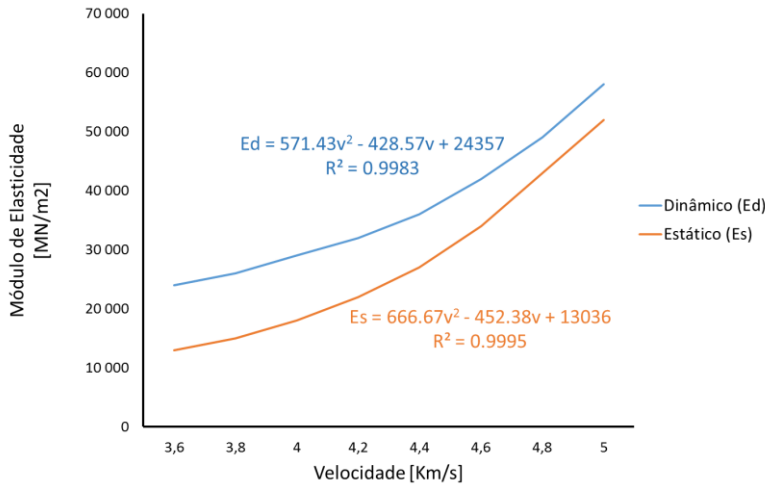


Figura 4.46 — Relação empírica entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos do betão (BS 1881, 1986).

Na Figura 4.47 são apresentadas as estimativas dos valores do módulo de elasticidade dinâmico do betão, obtidos a partir de uma simulação estocástica para os degraus de bancada das filas 14 e 15 dos alinhamentos dos degraus 7 e 8 da bancada sul. É ainda apresentada a lei de distribuição normal que melhor se ajusta aos resultados da simulação.

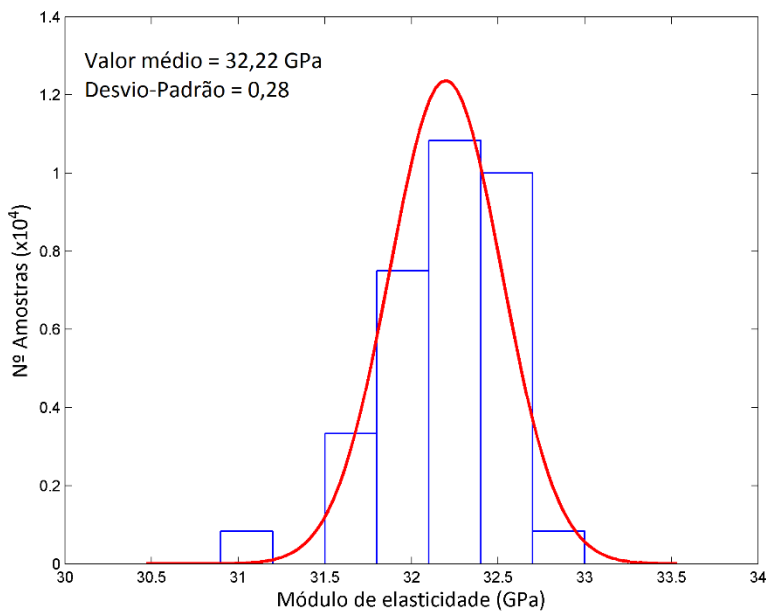


Figura 4.47 — Estimativa dos valores do módulo de elasticidade dinâmico do betão.

O módulo de elasticidade dinâmico do betão segue uma lei de distribuição normal com um valor médio igual a 32,22 GPa e um coeficiente de variação de 0,28. Os resultados revelaram que a estimativa do módulo de elasticidade do betão conduziu a um valor médio inferior ao valor médio do módulo de elasticidade calculado para um betão da classe C30/37 à data da campanha experimental, ou seja, 35,81 GPa conforme se verá mais adiante na Secção 5.2.2.

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA E CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL DOS DEGRAUS DE BANCADA DAS BANCADAS DO ESTÁDIO DO DRAGÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrita a modelação numérica e a calibração experimental dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão com base em parâmetros modais.

O modelo numérico dos degraus de bancada foi desenvolvido com recurso ao programa Autodesk ROBOT (2015).

A calibração do modelo numérico é realizada por aplicação de um algoritmo genético com base na informação experimental da fase 1 dos ensaios dinâmicos.

Para a calibração do modelo numérico será realizada uma análise de sensibilidade, uma otimização, e uma análise de correlação entre as respostas modais experimentais e numéricas, antes e após a calibração. Será ainda realizada uma análise de sensibilidade a alguns dos operadores do algoritmo genético utilizado na calibração do modelo com o objetivo de avaliar a robustez e estabilidade do algoritmo.

5.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DOS DEGRAUS DE BANCADA DA BANCADA DO ESTÁDIO DO DRAGÃO

Nesta secção é descrito o modelo de elementos finitos dos degraus de bancada do Estádio do Dragão, caracterizando-se as propriedades geométricas e mecânicas dos elementos estruturais que os constituem, além da caracterização dos seus parâmetros modais.

5.2.1 Modelo numérico

O modelo de elementos finitos dos degraus de bancada foi desenvolvido com recurso ao programa Autodesk ROBOT (2015). Na Figura 5.1a apresenta-se uma perspetiva tridimensional do modelo de elementos finitos o qual comporta um conjunto de 10 degraus de bancada.

Os degraus de bancada e as cantoneiras metálicas foram modeladas através de elementos finitos de casca, enquanto os conetores metálicos M20, os elementos de EPDM da ligação entre degraus e os apoios em neoprene foram modelados através de elementos finitos de barra. Os conetores M20 foram modelados com o comprimento 8 cm que compreende a distância entre o eixo do patamar do degrau e o topo da parede da nervura do degrau inferior. A consideração do comprimento que compreende a parte interior do degrau está relacionada com o facto de não ser possível identificar as características mecânicas essenciais à modelação da argamassa que envolve os conetores M20. Os elementos de EPDM foram modelados considerando um comprimento de 20 mm, uma área A_x igual a 250 cm², e momentos de inércia I_x igual a 52604,17 cm⁴, I_y igual a 52083,33 cm⁴ e I_z igual a 520,83 cm⁴, considerando os eixos de coordenadas globais do modelo numérico de elementos finitos.

A seleção de um número alargado de degraus de bancada, para além do degrau de referência da fila 14, está relacionado com o facto de se pretender atender à influência da ligação entre os degraus de bancada nas propriedades modais.

A dimensão da malha de elementos finitos foi condicionada pelo posicionamento dos conectores, e elementos de EPDM da ligação entre degraus, e que materializam as ligações rígidas e flexíveis entre os degraus de bancada, respetivamente (Figura 4.10). Foi condicionada pelos apoios de extremidade, que são constituídos por perfis metálicos do tipo L 100x100x10, fixos às vigas de suporte da bancada por intermédio de um conector metálico, e apoios em neoprene (Figura 5.1b). Os apoios em neoprene foram modelados considerando um comprimento de 15 mm, uma área A_x igual a 180 cm², e momentos de inércia I_x igual a 5535 cm⁴, I_y igual a 3375 cm⁴ e I_z igual a 2160 cm⁴, considerando os eixos de coordenadas globais do modelo numérico de elementos finitos.

O espaçamento regular da malha de elementos finitos é aproximadamente igual a 0,25 m, enquanto nas zonas de ligação entre degraus e apoios passa a cerca de 0,10 m.

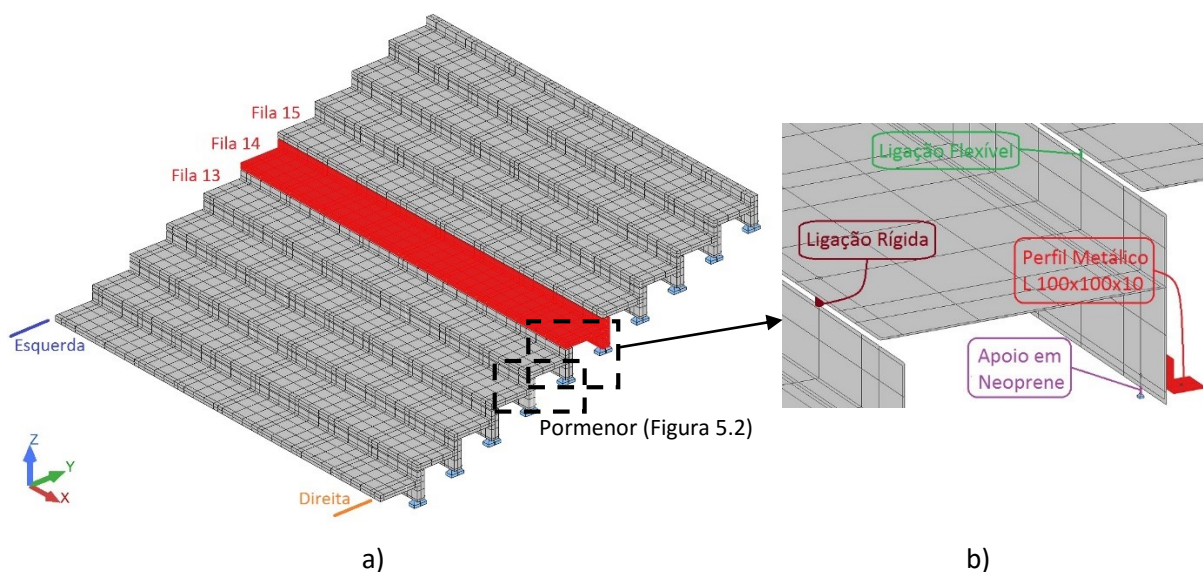


Figura 5.1 — Modelo numérico dos degraus de bancada: a) vista geral tridimensional; b) pormenor das ligações entre os degraus e dos apoios dos degraus.

No modelo numérico foram reproduzidos todos os elementos estruturais que constituem os degraus de bancada, de acordo com as indicações do projeto e todas as dimensões foram confirmadas no local. Todos os degraus foram modelados com um vão de 8,22 m.

Na modelação foi dada especial atenção à ligação entre o patamar e a nervura do degrau, nos quais foi criado um material sem massa, de modo a não haver duplicação de massa na união dos elementos planares que constituem o modelo de elementos finitos (Figura 5.2). As extremidades das ligações flexíveis e ligações rígidas, na interceção do patamar e da nervura do degrau de bancada, foram introduzidos troços rígidos de modo a materializar a ligação destes elementos, com o objetivo de reproduzir corretamente os comprimentos de deformabilidade das ligações (Figura 5.2).

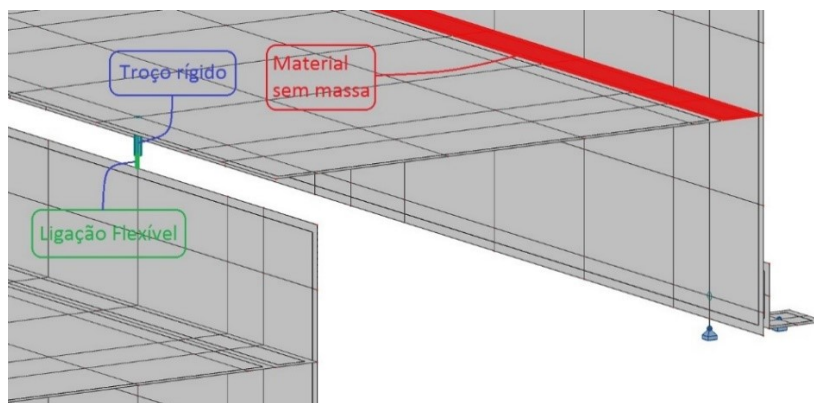


Figura 5.2 — Ligação entre o patamar e a nervura dos degraus com material sem massa, e troço rígido nas ligações rígidas e flexíveis na interceção do patamar e da nervura.

5.2.2 Propriedades geométricas e mecânicas

Na presente secção serão apresentadas as características geométricas e mecânicas dos elementos que constituem os degraus de bancada do estádio do dragão.

No Quadro 5.1 são apresentados os parâmetros geométricos e mecânicos mais relevantes adotados no modelo numérico dos degraus de bancada, incluindo a sua designação, o valor adotado e as respetivas unidades.

Quadro 5.1 – Caracterização dos parâmetros do modelo numérico dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão.

Parâmetros		Unidades	Valor adotado	
E_c	Módulo de Elasticidade do betão	GPa	35,8* 32,2**	
ρ_c	Massa volúmica do betão	kN/m ³	25	
ν_c	Coefficiente de Poisson do betão	-	0,2	
E_{M20}	Módulo de elasticidade do aço do conetor M20 na ligação entre degraus	GPa	210	
ρ_{M20}	Massa volúmica do aço do conetor M20 na ligação entre degraus	kN/m ³	77	
$E_{S,0}$	Módulo de elasticidade do aço do na ligação entre o degrau e a viga de bancada	GPa	210	
$E_{S,13L}$				Outras Filas
$E_{S,13R}$				Fila 13 (Esquerda)
$E_{S,14L}$				Fila 13 (Direita)
$E_{S,14R}$				Fila 14 (Esquerda)
$E_{S,15L}$				Fila 14 (Direita)
$E_{S,15R}$				Fila 15 (Esquerda)
ρ_s	Massa volúmica do aço na ligação entre o degrau e a viga de bancada	kN/m ³	70	
ν_s	Coefficiente de Poisson do aço na ligação entre o degrau e a viga de bancada	-	0,3	
E_{EPDM}	Módulo de elasticidade do EPDM na ligação flexível entre degraus	MPa	50	
ρ_{EPDM}	Massa volúmica do EPDM na ligação flexível entre degraus	kN/m ³	12,05	
$E_{N,0}$	Módulo de elasticidade do Neoprene na ligação entre o degrau e a viga de bancada	MPa	50	
$E_{N,13E}$				Outras Filas
$E_{N,13D}$				Fila 13 (Esquerda)
$E_{N,14E}$				Fila 13 (Direita)
$E_{N,14D}$				Fila 14 (Esquerda)
$E_{N,15E}$				Fila 14 (Direita)
$E_{N,15D}$				Fila 15 (Esquerda)
ρ_N	Massa volúmica do Neoprene na ligação entre o degrau e a viga de bancada	kN/m ³	12,05	

(*) Valor obtido com base nos resultados de ensaios de compressão de provetes de betão

(**) Valor obtido com base em ensaios realizados com recurso à técnica de ultra-sons nas nervuras dos degraus de bancada

O módulo de elasticidade do betão foi inicialmente estimado com base nos ensaios à compressão realizados pelo fabricante dos degraus, a Prégaia (Figueiras, 2004), e cujos resultados são apresentados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Resultados de ensaios de rotura por compressão em provetes de betão dos degraus de bancada do estádio do dragão (adaptado de Figueiras, 2004).

Data de fabrico	Data de Ensaio	Tensão de rotura (MPa)
02-08-2002	30-08-2002	44,2
06-08-2002	03-09-2002	43,8
07-08-2002	04-09-2002	43,2
09-08-2002	06-09-2002	42,9
09-08-2002	06-09-2002	43,2
19-08-2002	16-09-2002	43,5
21-08-2002	18-09-2002	43,5
23-08-2002	20-09-2002	44,1
29-08-2002	26-09-2002	45,0
30-08-2002	27-09-2002	44,1

Na Figura 5.3 apresentam-se os valores médios da tensão de rotura à compressão do betão, $f_{cm}(t)$, obtida com base nos valores individuais dos provetes ensaiados, comparando com as curvas de evolução da tensão de rotura à compressão dos betões das classes C30/37 e C40/50 (NP EN 1992-1-1, 2010).

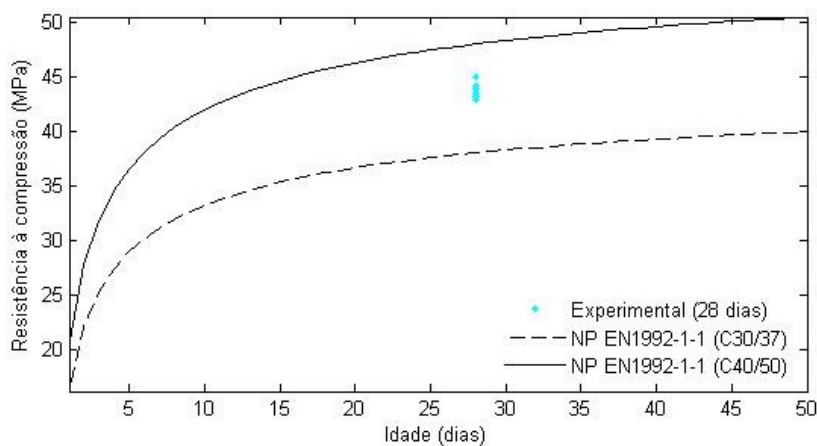


Figura 5.3 — Representação dos valores médios da resistência à compressão do betão aplicado comparativamente a betões da classe C30/47 e C40/50.

O valor médio da tensão de rotura à compressão do betão obtido com base nos 10 provetes ensaiados é igual a 43,75 MPa, com um desvio-padrão de 0,62 MPa. Considerando-se uma distribuição normal, o valor característico da tensão de rotura à compressão do betão aos 28 dias associado ao percentil

5 %, $f_{ck, cube}$, é de 42,73 MPa. Este valor é próximo ao que seria expectável para um betão da classe de resistência C30/37.

A evolução temporal de resistência à compressão do betão, $f_{cm}(t)$ (NP EN 1992-1-1, 2010), é dada por:

$$f_{cm}(t) = \beta_{CC}(t)f_{cm} \quad (5.1)$$

com $\beta_{CC}(t)$ a ser retirado da Expressão (3.2) da NP EN 1992-1-1, (2010),

$$e^{s\left[1-\left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]} \quad (5.2)$$

O valor médio do módulo de elasticidade (E_{cm}) do betão foi obtido a partir do valor médio da tensão de rotura à compressão do betão por aplicação da expressão (NP EN 1992-1-1, 2010):

$$E_{cm} = 22 \cdot \left[\frac{f_{cm}}{10}\right]^{0,3} \quad (5.3)$$

e que foi adotada por Bamforth *et al.*, (2008) para provetes cúbicos:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left[\frac{kf_{cm,cube}}{10}\right]^{0,3} \quad (5.4)$$

na qual k é um coeficiente que faz a conversão dos valores da tensão de rotura à compressão de cubos em cilindros e toma o valor aproximadamente igual a 0,80 para betões de resistência normal (Bamforth *et al.*, 2008).

A variação do módulo de elasticidade do betão, $E_{cm}(t)$, foi obtido por aplicação da expressão (NP EN 1992-1-1, 2010):

$$E_{cm}(t) = [\beta_{CC}(t)]^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (5.5)$$

Na Figura 5.4 são representadas as curvas da evolução do módulo de elasticidade dos betões das classes C30/37, C40/50, e do betão dos degraus de bancada do Estádio do Dragão.

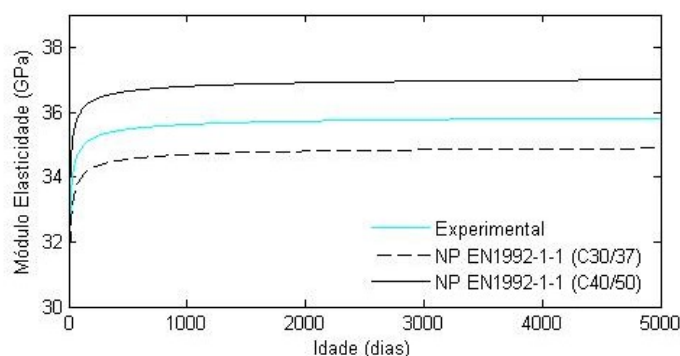


Figura 5.4 — Evolução do módulo de elasticidade do betão aplicado comparativamente a betões da classe C30/45 e C40/50.

O valor médio do módulo de elasticidade foi estimado considerando o módulo de elasticidade do betão ensaiado aos 28 dias de idade ($E_{cm}=33,88$ GPa), o qual foi corrigido considerando a idade do betão à data da realização dos ensaios de dinâmicos (≈ 4850 dias), obtendo-se o resultado igual a 35,81 GPa (+ 5,7 %). Considerou-se $t=0$, a data do início dos ensaios de rotura realizados pelo fabricante, os quais correspondem à data provável de início de produção dos degraus, ou seja, setembro de 2002.

Contudo, o valor do módulo de elasticidade obtido foi corrigido de modo a ter em consideração a presença de armaduras ordinárias em aço. O módulo de elasticidade do betão da secção homogeneizada (E_{hm}) é determinado com a aplicação da expressão:

$$E_{hm} = E_{cm}(1 - \rho_s) + E_{sm} \cdot \rho_s \quad (5.6)$$

Em que, ρ_s é a percentagem da armadura ordinária em aço, igual a 1,2 %, e E_{sm} é o módulo de elasticidade do aço, igual a 200 GPa, e para o betão foi adotado o valor de do módulo de elasticidade igual a 35,81 GPa, resultando no valor de E_{sm} igual a 37,81 GPa.

A comparação das estimativas dos valores médios do módulo de elasticidade do betão obtido com base nos ensaios de resistência realizados, à data da construção dos degraus, e através de ensaios de ultra-sons à data do ensaio dinâmico, permitiu constatar diferenças bastante significativas: 35,81 GPa, no primeiro caso comparativamente aos 32,22 GPa no segundo caso. Para o modelo numérico optou-se por adotar o valor, ou seja 32,22 GPa.

Ainda em relação ao material betão, de acordo com a NP EN 1991-1-1 (2009), foi considerado para o coeficiente de Poisson, ν , o valor de 0,2, e para a massa volúmica o valor médio de 2548,42 kg/m³ (25 kN/m³).

Para os conectores entre os degraus de bancada e para os perfis metálicos dos apoios foi considerado um aço com módulo de elasticidade igual a 210 GPa, massa volúmica de 7850 kg/m^3 (77 kN/m^3), e um coeficiente de Poisson, ν , igual a 0,30 (NP EN 1993-1-1, 2010).

Relativamente aos aparelhos de apoio em neoprene dos degraus de bancada e às tiras de EPDM que materializam as ligações flexíveis entre degraus de bancada, foi considerado um módulo de elasticidade de 50 MPa, a massa volúmica de 1230 kg/m^3 ($12,05 \text{ kN/m}^3$) (Ribeiro, 2012).

A massa dos elementos não estruturais, em particular os lugares de degraus de bancada formados por uma estrutura metálica tubular com apoio de chão, incluindo os assentos e costas, foram calculadas e adicionadas aos nós da malha de elementos finitos cuja posição corresponde à localização destes elementos. O valor da massa destes elementos é de 20 kg/m , atendendo à distribuição linear destas cargas sobre os degraus de bancada.

5.2.3 Parâmetros modais

5.2.3.1 Frequências e modos de vibração

Os parâmetros modais dos degraus de bancada referem-se às frequências naturais e correspondentes modos de vibração associados a movimentos do conjunto de 10 degraus incluídos na modelação numérica. No Quadro 5.3 apresentam-se os resultados da análise modal do modelo numérico para os primeiros vinte e cinco modos de vibração, com a indicação das suas frequências naturais e a descrição do tipo de modo. São identificados a negrito os modos com maior semelhança aos modos de vibração identificados experimentalmente.

Quadro 5.3 – Parâmetros modais obtidos por via numérica.

Modo	f (Hz)	Descrição dos modos de vibração
1	10,01	1º modo de flexão vertical
2	10,72	1º modo de flexão vertical
3	12,10	1º modo de flexão vertical
4	13,52	1º modo de flexão vertical e transversal
5	15,13	1º modo de flexão vertical + torção
6	17,25	1º modo de flexão vertical + torção
7	18,57	1º modo de flexão vertical + torção
8	18,96	1º modo de flexão vertical + torção
9	20,66	1º modo de flexão vertical + torção
10	20,85	1º modo de flexão vertical + torção
11	22,20	1º modo de flexão vertical + 2º modo de flexão vertical
12	22,70	Torção
13	23,32	Torção
14	23,88	2º modo de flexão vertical
15	25,28	Torção
16	26,05	2º modo de flexão vertical + Torção
17	26,15	2º modo de flexão vertical + Torção
18	27,84	Torção
19	28,61	2º modo de flexão vertical
20	30,71	2º modo de flexão vertical
21	31,15	2º modo de flexão vertical + Torção
22	31,41	2º modo de flexão vertical + Torção
23	34,49	Torção
24	35,72	2º modo de flexão vertical + Torção
25	38,18	2º modo de flexão vertical + Torção

Na Figura 5.5 apresentam-se as configurações modais dos modos 3, 7, 9, 13 e 20 que apresentam maior semelhança com os modos identificados experimentalmente.

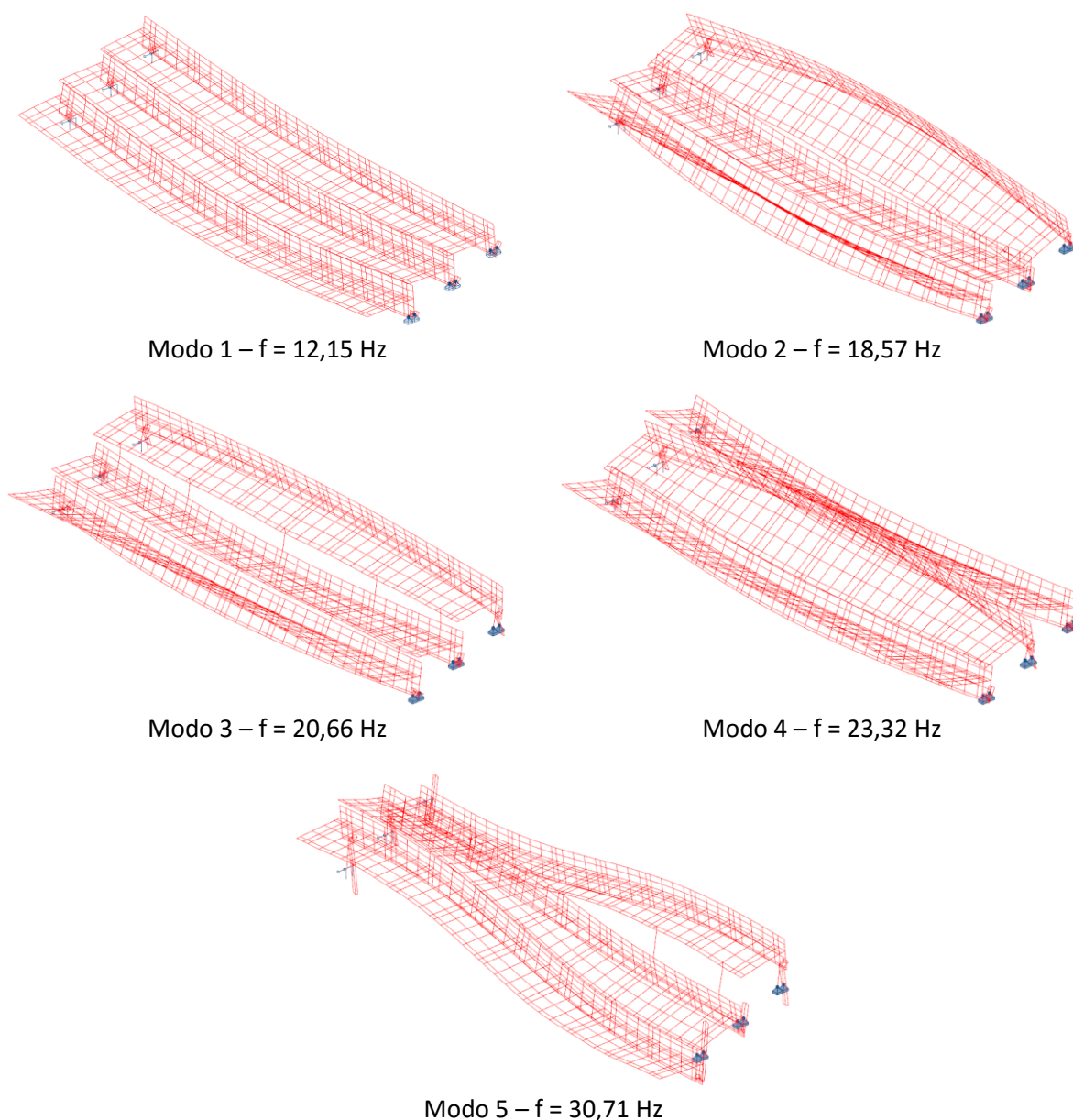


Figura 5.5 — Configurações modais dos modos 3, 7, 9, 13 e 20 do modelo numérico.

É importante referir que as condições de fronteira do modelo numérico não estão totalmente modeladas, o que poderá influenciar os resultados de alguns dos modos analisados, sobretudo aqueles que envolvem movimentos mais pronunciados dos degraus das extremidades inferior e superior. No entanto, os degraus considerados no modelo numérico são considerados suficientes para garantir adequadas condições de fronteira do degrau alvo do presente estudo, ou seja, o degrau da fila 14, localizado na zona central do modelo numérico.

A análise do Quadro 5.3, permite constatar que os modos mais predominantes envolvem sobretudo a flexão vertical e a torção dos degraus de bancada. Em alguns modos verifica-se o acoplamento entre movimentos de flexão vertical/transversal e de torção dos degraus.

5.2.3.2 Análise de correlação

Na Figura 5.6 é realizada a comparação das configurações modais dos degraus de bancada, das fila 13, 14 e 15 da bancada sul do Estádio do Dragão, obtidos por via experimental e numérica antes da calibração. São ainda indicados os valores das frequências de vibração experimentais e numéricas, com a indicação da diferença percentual tomando como referência os valores experimentais e os valores do parâmetro MAC.

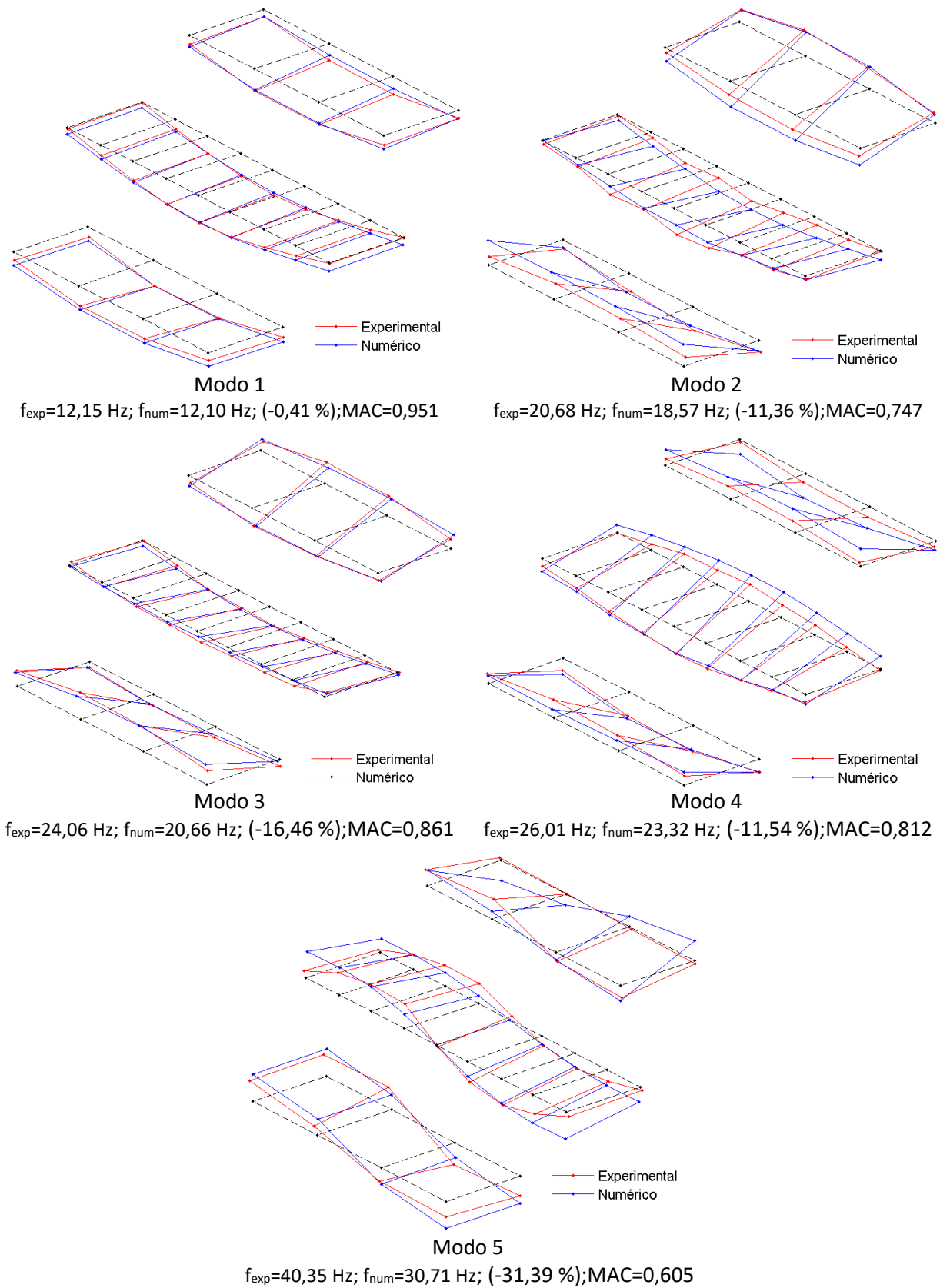


Figura 5.6 — Configurações modais experimentais e numéricas antes da calibração.

O modo 1 é aquele cuja configuração numérica mais se aproxima da configuração modal experimental (MAC=0,951). Os restantes modos de vibração apresentam com uma configuração modal numérica bastante afastada da configuração experimental facto que reforça a necessidade de proceder a uma calibração do modelo numérico.

5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DOS DEGRAUS DE BANCADA

O processo de calibração do modelo numérico dos degraus de bancada envolveu três etapas: a análise de sensibilidade, a otimização e a análise de correlação. A técnica adotada para o emparelhamento dos modos de vibração numéricos e experimentais será também abordada. Será ainda realizada uma análise de robustez a alguns dos operadores do algoritmo genético. A anteceder a calibração automática do modelo numérico foram ainda realizadas algumas análises paramétricas com o objetivo de avaliar a influência de alguns parâmetros numéricos específicos nas respostas modais.

5.3.1 Informação experimental

No Quadro 5.4, apresenta-se, de forma esquemática, a informação dos modos experimentais utilizada na calibração do modelo numérico dos degraus de bancada nomeadamente as ordenadas modais consideradas para cada um dos modos experimentais. As ordenadas modais foram divididas nas direções x, y e z de acordo com o referencial identificado na Figura 5.1.

Quadro 5.4 – Informação dos modos de vibração experimentais utilizados na calibração do modelo numérico dos degraus de bancada.

Modo	Ordenadas modais		
	x	y	z
1	×	✓	✓
2	×	✓	✓
3	×	✓	✓
4	×	✓	✓
5	×	✓	✓

Os parâmetros modais não foram medidos na direção x, ou seja na direção longitudinal dos degraus.

5.3.2 Análise paramétrica

5.3.2.1 Influência do número de degraus

O presente estudo envolveu a análise do número de degraus a considerar no modelo numérico com influência nas respostas modais. Foram analisados 16 modelos cujos números de degraus variaram de 3 a 18 degraus.

Na Figura 5.7 apresenta-se a variação dos resultados do emparelhamento de modos de vibração experimentais e numéricos em função do número de degraus de bancada onde é possível constatar que o modelo com 18 degraus corresponde ao modelo cujas respostas numéricas mais se aproximam das respostas experimentais, com um resíduo das frequências e um resíduo dos parâmetros MAC mais baixo, comparativamente aos restantes modelos. No entanto os modelos com 9 e 10 degraus conseguiram uma boa aproximação, verificando-se que o modelo com 10 degraus é aquele cujos resultados mais se aproximam do modelo de 18 degraus, face às condições de fronteira presentes nos dois modelos.

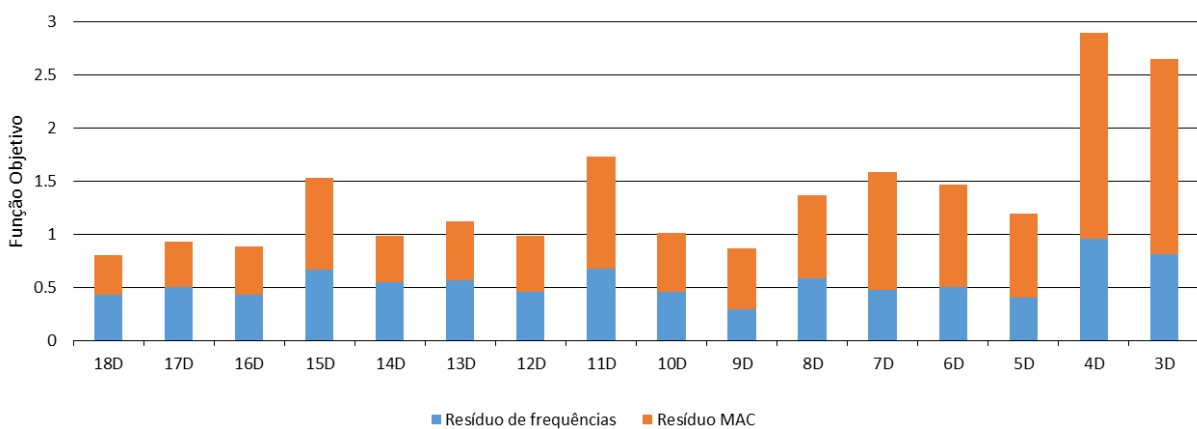


Figura 5.7 — Variação dos resultados do emparelhamento de modos de vibração experimental/numérico em função do número de degraus de bancada.

5.3.3 Análise de sensibilidade

No Quadro 5.5 são identificados os parâmetros numéricos utilizados na análise de sensibilidade com a indicação das respetivas unidades e limites de variação inferiores e superiores, além do valor adotado no modelo numérico inicial.

Quadro 5.5 – Caracterização dos parâmetros do modelo numérico dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão.

Parâmetros		Unidades	Valor adotado	Limite	
				Inferior	Superior
E_c	Módulo de Elasticidade do betão	GPa	32,2	28,0	36,0
ρ_c	Massa volúmica do betão	kN/m ³	25	--	--
E_{M20}	Módulo de elasticidade do aço do conector M20 na ligação entre degraus	GPa	210	150	250
$E_{S,0}$	Módulo de elasticidade do aço do na ligação entre o degrau e a viga de bancada	Outras Filas		GPa	210
$E_{S,13L}$		Fila 13 (Esquerda)			
$E_{S,13R}$		Fila 13 (Direita)			
$E_{S,14L}$		Fila 14 (Esquerda)			
$E_{S,14R}$		Fila 14 (Direita)			
$E_{S,15L}$		Fila 15 (Esquerda)			
$E_{S,15R}$		Fila 15 (Direita)			
E_{EPDM}	Módulo de elasticidade do EPDM na ligação flexível entre degraus	MPa	50	0	150
$E_{N,0}$	Módulo de elasticidade do Neoprene na ligação entre o degrau e a viga de bancada	Outras Filas		MPa	50
$E_{N,13E}$		Fila 13 (Esquerda)			
$E_{N,13D}$		Fila 13 (Direita)			
$E_{N,14E}$		Fila 14 (Esquerda)			
$E_{N,14D}$		Fila 14 (Direita)			
$E_{N,15E}$		Fila 15 (Esquerda)			
$E_{N,15D}$		Fila 15 (Direita)			

Relativamente aos parâmetros apresentados convém justificar a sua inclusão e noutras situações, explicar os seus limites de variação.

Os resultados do ensaio de ultra-sons permitiram estimar um valor médio do módulo de elasticidade dinâmico do betão igual a 32,2 GPa com um coeficiente de variação de 0,28. Os limites de variação deste parâmetro foram, no entanto, alargados para atender ao facto de o ensaio de ultra-sons ter sido realizado em um número limitado de degraus de bancada devido a condicionalismos na acessibilidade aos restantes degraus

Henriques (1998) refere haver uma forte correlação entre o módulo de elasticidade do betão e a sua resistência à compressão, apontando valores do coeficiente de variação do módulo de elasticidade do betão iguais a 7,7%, no caso do módulo de elasticidade inicial, e de 12% no caso do módulo de deformabilidade secante, os quais foram calculados segundo uma lei de distribuição normal de média nula.

A definição dos limites de variação do módulo de elasticidade do aço dos conectores de ligação entre os degraus de bancada e entre os degraus e a viga de bancada, permitiu atender a algumas particularidades observadas *in situ*, em particular, a utilização de um maior número de conectores do que os previstos em projeto, a utilização de conectores de diâmetro diferente do especificado em projeto, e a perda de rigidez da conexão devido ao deficiente preenchimento dos furos com bucha química.

A definição dos limites de variação do módulo de elasticidade da borracha EPDM e do neoprene, na ligação entre os degraus de bancada e entre os degraus e as vigas de bancada, respetivamente, permitiu também atender a situações observadas *in situ*, nomeadamente, a degradação ou inexistência dos apoios e a utilização de apoios elásticos em materiais diferentes do especificado em projeto.

Na Figura 5.8 apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade com recurso a uma matriz de coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros numéricos e as respostas (frequências naturais e modos de vibração) do modelo dos degraus de bancada das bancadas. A análise de sensibilidade foi realizada com recurso a uma técnica de amostragem estocástica baseada em 1000 amostras geradas pelo método do Hipercubo Latino. Os coeficientes de correlação situados no intervalo $[-0,20; 0,20]$ foram excluídos da representação gráfica.

A matriz de correlação mostra que o módulo de elasticidade do betão (E_c), o módulo de elasticidade do aço dos conectores de ligação entre os degraus de bancada (E_{M20}), o módulo de elasticidade do EPDM entre os degraus de bancada (E_{EPDM}), e o módulo de elasticidade do neoprene (E_N) dos apoios da quase totalidade das filas, são os parâmetros que mais influenciam as respostas modais. Em particular, o aumento do módulo de elasticidade do betão (E_c) provoca o aumento generalizado das frequências de todos os modos de vibração. O módulo de elasticidade do aço dos conectores M20 na ligação entre os degraus (E_{M20}) influencia a configuração modal do modo de vibração 3, mas apresenta uma fraca correlação com todas as frequências próprias. O módulo de elasticidade do EPDM entre degraus (E_{EPDM}) influencia as frequências próprias e configurações dos modos 3 a 5. O módulo de elasticidade do neoprene dos apoios de algumas das filas ($E_{N,0}$, $E_{N,13E}$, $E_{N,13D}$ e $E_{N,14D}$) influenciam as frequências próprias e as configurações da maioria dos modos. A variação dos parâmetros do apoio materializado pela cantoneira metálica ($E_{S,0}$, $E_{S,13E}$, $E_{S,13D}$, $E_{S,14E}$, $E_{S,14D}$, $E_{S,15E}$ e $E_{S,15D}$), e do apoio em neoprene esquerdo da fila 15 ($E_{N,15E}$), não influenciam significativamente as respostas, pelo que serão excluídos da fase de otimização.

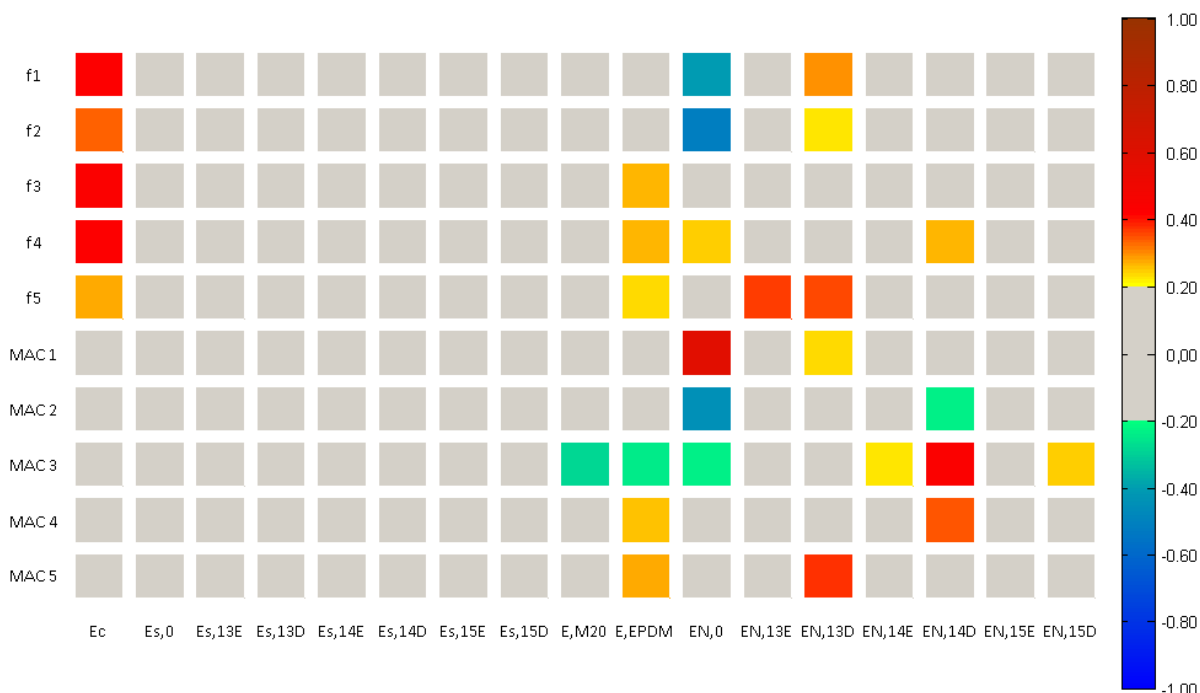


Figura 5.8 — Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros numéricos e as respostas do modelo dos degraus de bancada.

Na Figura 5.9 apresenta-se, a título de exemplo, dois gráficos de Anthill das correlações entre o módulo de elasticidade do betão (E_c) e a frequência do modo 1 e entre o módulo de elasticidade do aço da cantoneira metálica dos degraus das restantes filas ($E_{s,0}$) e a frequência do modo 4. A correlação entre o módulo de elasticidade do betão (E_c) e a frequência do modo 1 é o exemplo de uma correlação razoável, com um valor positivo de aproximadamente 0,43. Curiosamente o parâmetro que apresenta o maior valor de correlação foi o módulo de elasticidade do neoprene dos apoios dos restantes degraus ($E_{N,0}$), com um valor igual a 0,58. Importa ainda salientar que na Figura 5.9a são visíveis dois tipos de correlação bem vincados, que representam o emparelhamento entre o modo experimental com modos numéricos distintos. Esta evidência revela alguma dificuldade em o parâmetro MAC garantir um emparelhamento estável entre os modos experimentais e numéricos.

A correlação do módulo de elasticidade do aço da cantoneira metálica dos degraus das restantes filas ($E_{s,0}$) com a frequência do modo 4, é um exemplo de uma correlação fraca entre variáveis, com um valor inferior do coeficiente de correlação a 0,05.

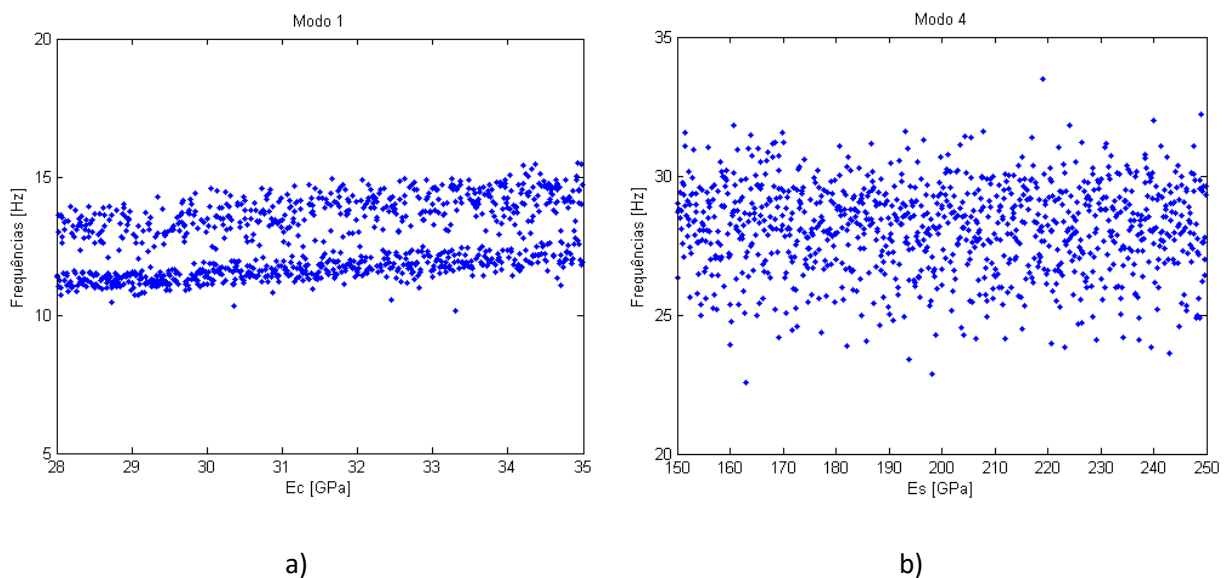


Figura 5.9 — Gráficos de Anthill: a) módulo de elasticidade do betão vs frequência do modo 1; b) módulo de elasticidade do aço da cantoneira metálica vs frequência do modo 4.

Nas Figura 5.10 e Figura 5.11 são apresentados os histogramas referentes à distribuição dos valores das frequências naturais e dos parâmetros MAC, respetivamente, obtidos com base nas 1000 amostras geradas na análise de sensibilidade. A traço vermelho descontínuo estão indicados os valores das frequências experimentais.

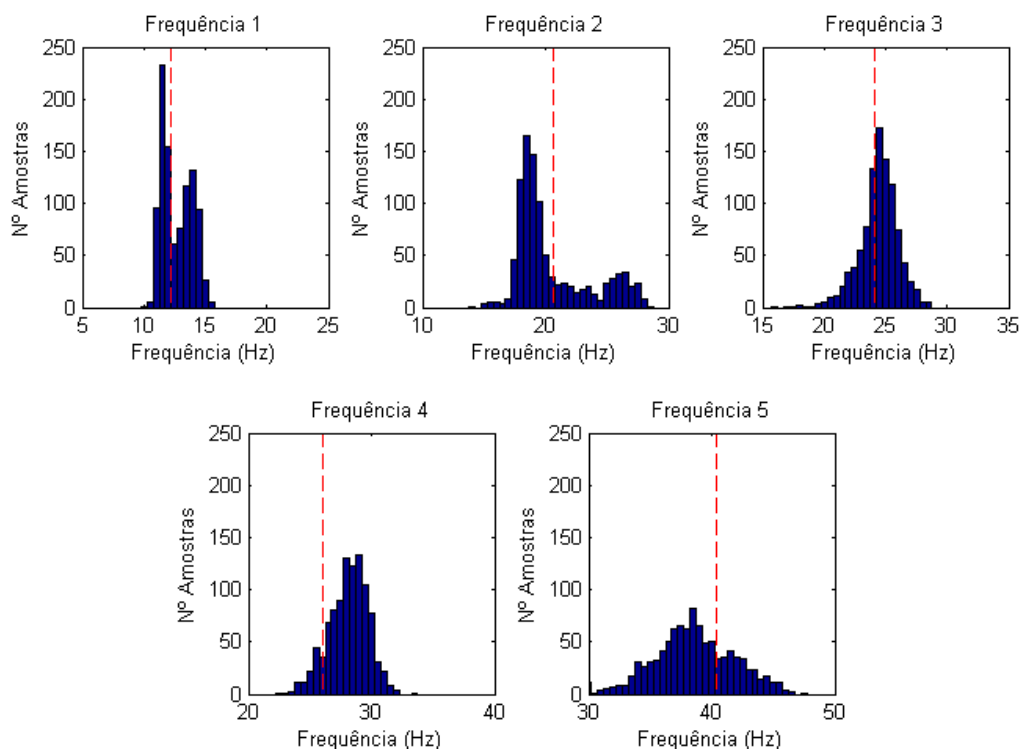


Figura 5.10 — Distribuição dos valores das frequências naturais obtidos com base análise de sensibilidade.

Da observação das figuras 3, 4 e 5 é possível constatar que a distribuição das frequências de vibração dos modos 3, 4 e 5 tendem a seguir uma lei aproximadamente normal, devido ao facto dos parâmetros que controlam estas respostas seguirem também uma lei normal, como é o caso, por exemplo, do módulo de elasticidade do betão (E_c). A distribuição das frequências do modo 1, evidenciam dois picos em correspondência com dois valores mais prováveis (bi-normal), facto que indicia que a técnica de emparelhamento de modos de vibração numéricos e experimentais não é suficientemente robusta e eficiente. O recurso ao parâmetro EMAC alternativamente ao parâmetro MAC poderia facilitar o emparelhamento do modo experimental, no entanto, não foi possível a sua implementação devido a limitações do programa Autodesk ROBOT (ver secção 3.5.2). O mesmo sucede, mas em maior escala, com a distribuição dos valores das frequências do modo 2. Globalmente, os valores das frequências experimentais apresentam-se dentro do intervalo dos valores obtidos na análise de sensibilidade, verificando-se que as frequências dos modos 2, 4 e 5 estão ligeiramente desviadas do valor médio das amostras realizadas.

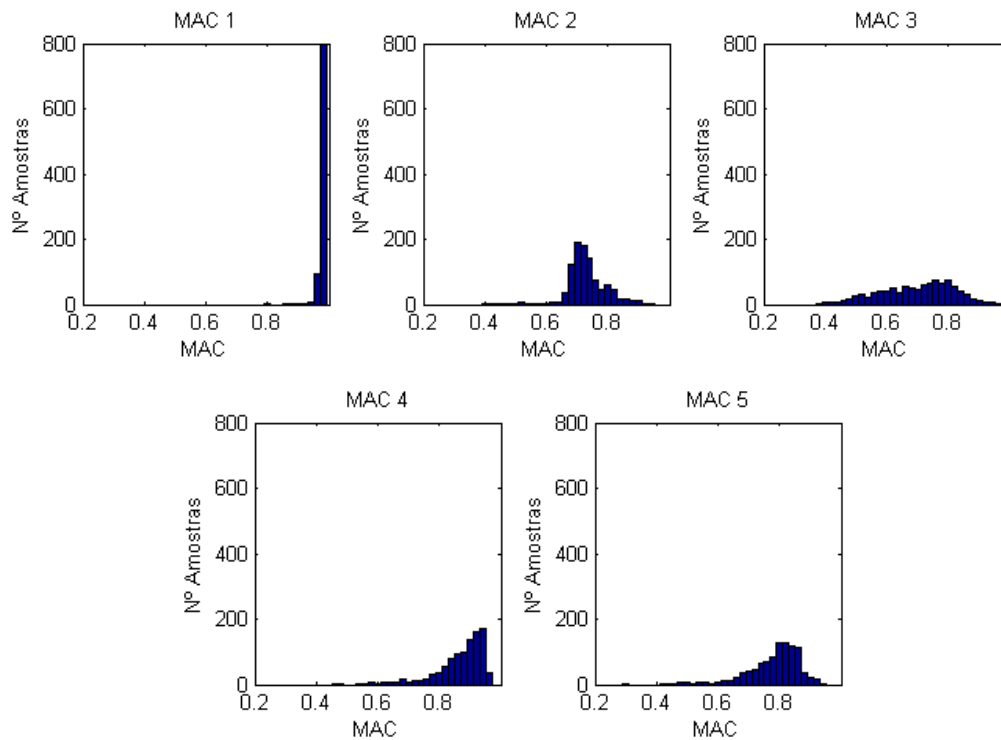


Figura 5.11 — Distribuição dos valores do parâmetro MAC obtidos na análise de sensibilidade.

Relativamente aos valores do parâmetro MAC, com exceção do modo 2, verifica-se que os modos de vibração apresentam de forma consistente valores acima de 0,80, atingindo mesmo valores acima de 0,98 no caso particular do modo 1. No modo 2 verifica-se que a maioria dos valores obtidos estão abaixo de 0,80, mas com alguns valores superiores a 0,90.

Importa ainda referir para a maioria dos modos de vibração existe uma elevada probabilidade dos valores das frequências de vibração numéricas se aproximarem dos valores das frequências experimentais, apesar do parâmetro MAC evidenciar dificuldades no emparelhamento de alguns modos.

A análise de sensibilidade permitiu identificar 9 parâmetros a incluir na fase de otimização.

5.3.4 Otimização

A fase de otimização teve como objetivo obter os valores dos parâmetros do modelo numérico que minimizam as diferenças entre os parâmetros modais numéricos e experimentais, e envolvem a definição de uma função objetivo e a aplicação de uma técnica de otimização baseada num algoritmo genético.

A função a objetivo (f) engloba dois termos, um relativo aos resíduos das frequências de vibração, e outra referente aos resíduos dos parâmetros MAC. Os fatores de pesagem a e b foram considerados iguais a 1,0.

$$f = a \sum_{i=1}^5 \frac{|f_i^{exp} - f_i^{num}|}{f_i^{exp}} + b \sum_{i=1}^5 |MAC(\phi_i^{exp}, \phi_i^{num}) - 1| \quad (5.7)$$

Na Expressão (5.7), f_i^{exp} corresponde à frequência de vibração experimental relativo ao modo i , f_i^{num} é a frequência de vibração do modo numérico i e $MAC(\phi_i^{exp}, \phi_i^{num})$ traduz o parâmetro MAC entre o vetores das respostas numérica e experimental do modo i .

A otimização do modelo numérico dos degraus de bancada envolveu 9 parâmetros numéricos (módulo de elasticidade do betão (E_c), módulo de elasticidade do aço do conector na ligação entre degraus (E_{M20}), módulo de elasticidade do EPDM na ligação entre degraus (E_{EPDM}), módulos de elasticidade do neoprene nos apoios dos degraus nas vigas de bancada ($E_{N,0}$, $E_{N,13E}$, $E_{N,13D}$, $E_{N,14E}$, $E_{N,14D}$, $E_{N,15D}$)) além de 10 respostas modais (5 frequências e 5 parâmetros MAC).

O algoritmo genético baseou-se numa população inicial constituída por 30 indivíduos gerada aleatoriamente através do método do Hipercubo Latino e compreendeu 100 gerações, num total de 3000 indivíduos. Neste algoritmo foi definido um número de elites igual a 1 e uma taxa de substituição de 5 %. A taxa de cruzamento foi considerada igual a 50 %.

Foram realizados quatro casos de otimização (GA1 a GA4) de modo a avaliar a robustez e estabilidade da solução ótima uma vez que os algoritmos genéticos, têm uma natureza estocástica. O tempo despendido no cálculo de cada indivíduo rondou os 45 s, num computador com dois processadores, marca INTEL, modelo T9400 a 2,53 GHz, e memória RAM de 8 Gb.

Na Figura 5.12 apresenta-se a evolução da função objetivo para o caso de otimização GA1 baseado numa população inicial de 30 indivíduos e compreendendo um total de 100 gerações. O valor médio dos indivíduos, representado a *, é calculado a partir da média dos indivíduos que constituem cada geração. O valor do melhor indivíduo, representado a •, é calculado com base no melhor indivíduo de cada geração. O mínimo da função objetivo estabilizou à terceira casa decimal a partir da geração 72, com um valor de 0,576.

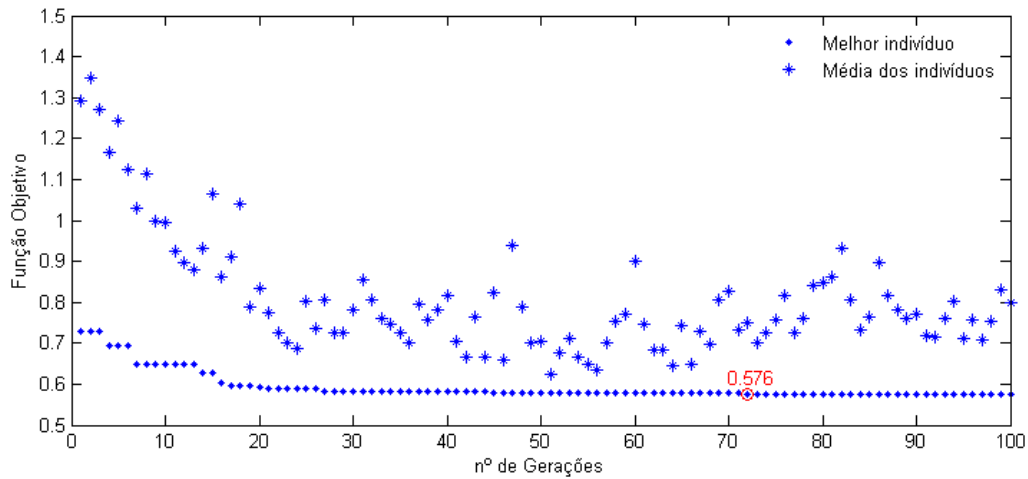


Figura 5.12 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA1, para um total de 100 gerações.

Nas Figura 5.13 a Figura 5.15, apresentam-se os gráficos da evolução da função objetivo com a identificação do melhor indivíduo e a média do conjunto dos indivíduos de cada geração, para os casos de otimização GA2 a GA4 e considerando 100 gerações.

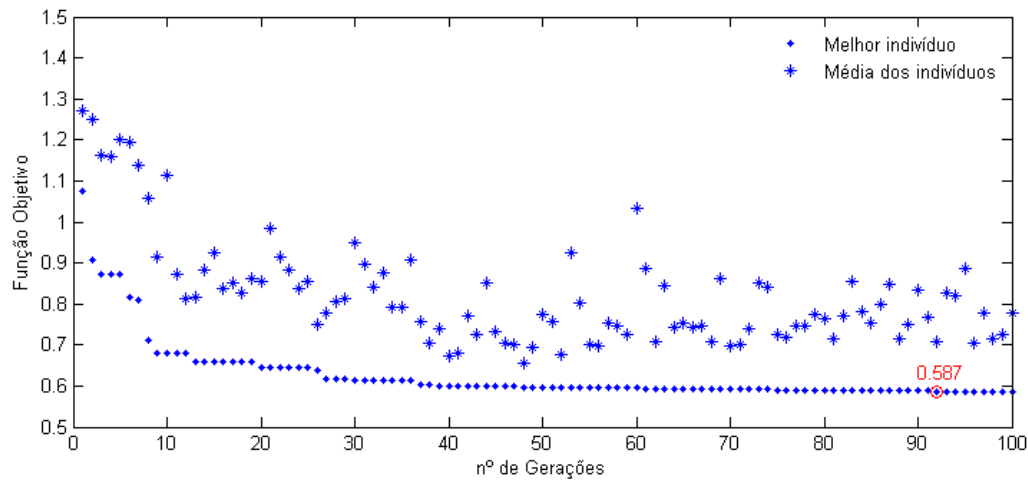


Figura 5.13 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA2.

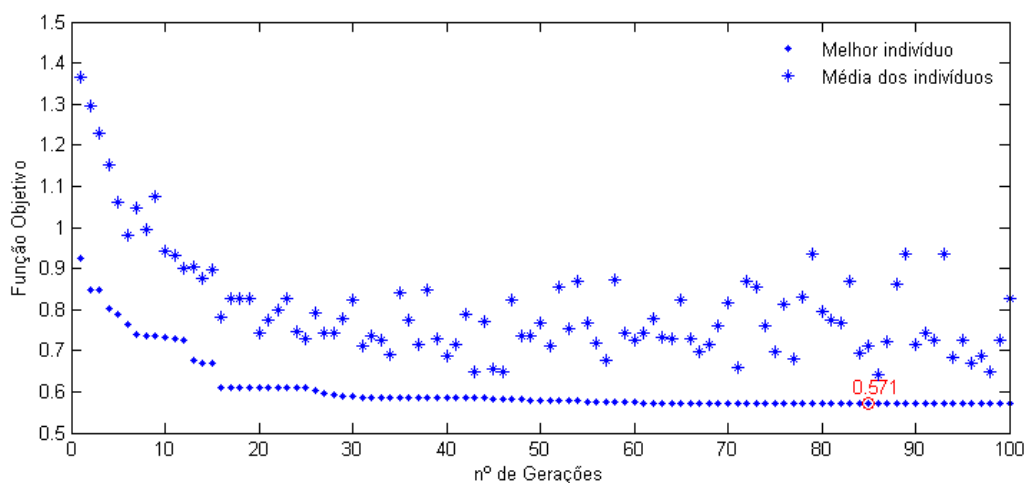


Figura 5.14 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA3.

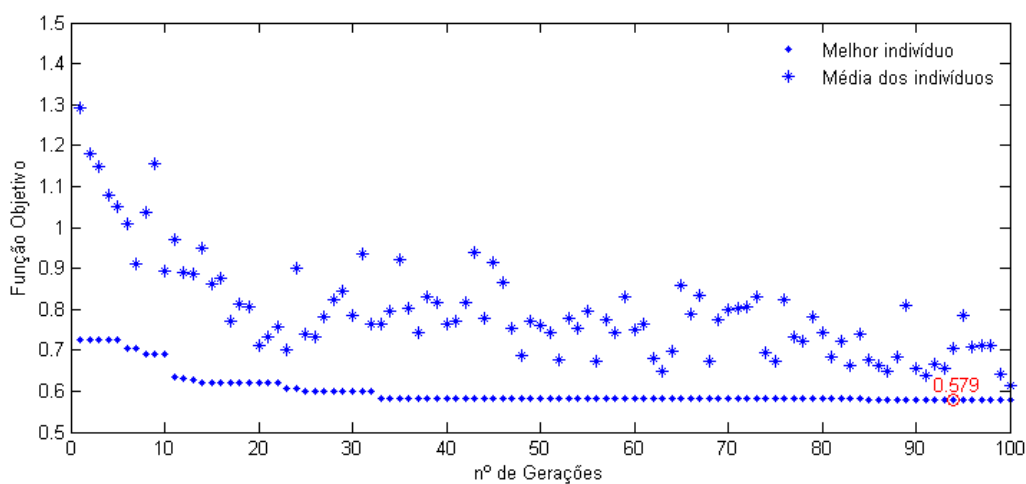


Figura 5.15 — Evolução da função objetivo (valor mínimo e valor médio) em função do número de gerações para o caso de otimização GA4.

Na Figura 5.16, a título comparativo, apresentam-se os gráficos da evolução dos valores da função objetivo com a identificação dos melhores indivíduos de cada geração para os casos de otimização GA1 a GA4.

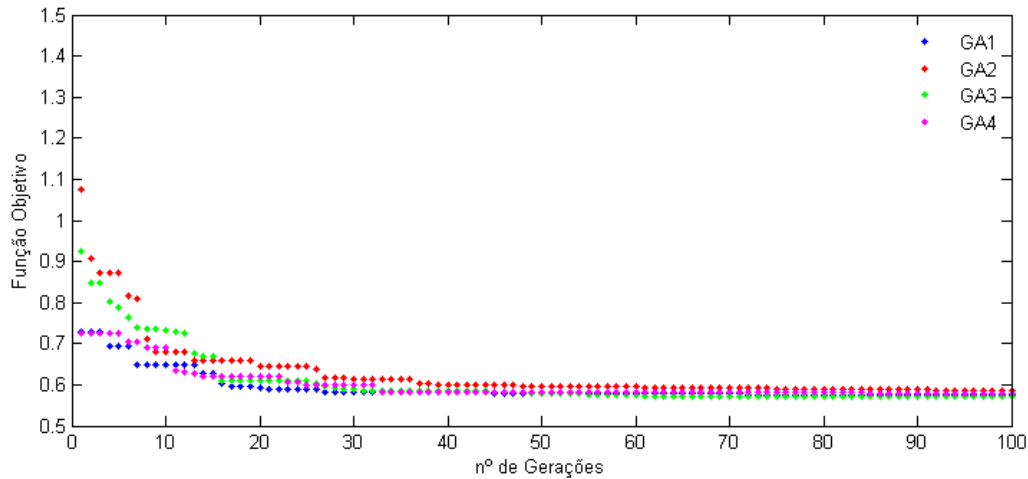


Figura 5.16 — Evolução dos valores mínimos da função objetivo em função do número de gerações para os casos de otimização GA1 a GA4.

Da análise das Figura 5.13 e Figura 5.15 constata-se que os valores mínimos da função objetivo, nos casos de otimização GA1 a GA4, são praticamente idênticos com valores que variam entre 0,571 e 0,587. É possível constatar, pela evolução dos valores médios, a provável presença de indivíduos falhados que se mantiveram ao longo de todo o processo de otimização. Esta situação pode estar provavelmente relacionada com um incorreto emparelhamento dos modos numéricos e experimentais, os quais tendem a ser minimizados com a evolução do processo de otimização, não afetando a convergência global do problema. Por outro lado, na Figura 5.16, a evolução dos valores mínimos da função objetivo apresenta algumas tendências diferenciadas nas primeiras gerações do processo de otimização (até à geração 15-20) e depois tendem a evoluir de forma bastante convergente e aproximada até ao valor mínimo ser atingido.

Na Figura 5.17 são apresentados os valores da função objetivo e dos resíduos das frequências e dos parâmetros MAC. Da análise dos resíduos das frequências e do parâmetro MAC, para os casos GA1 a GA4, constata-se que estas apresentam valores muito próximos. O ruído associado aos parâmetros MAC é cerca de quatro vezes superior aos das frequências.

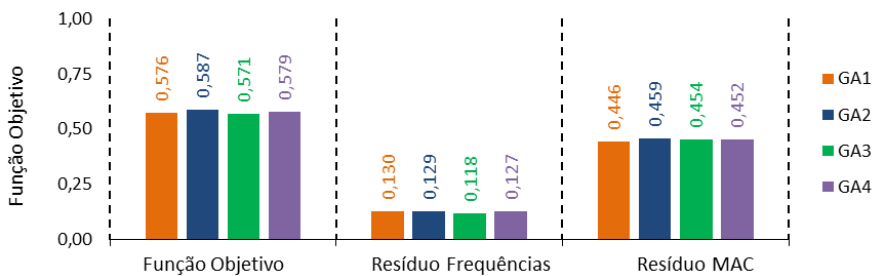
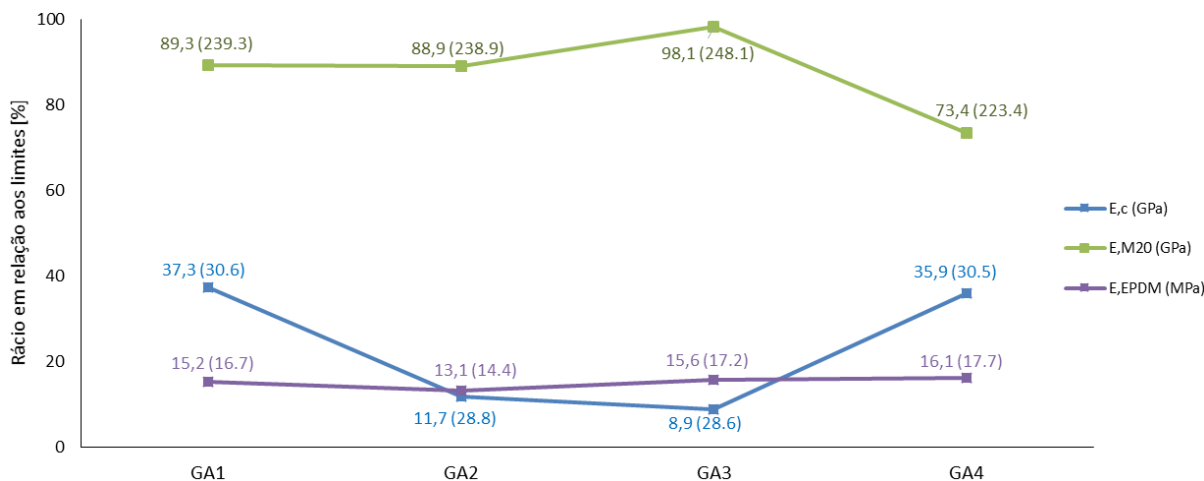
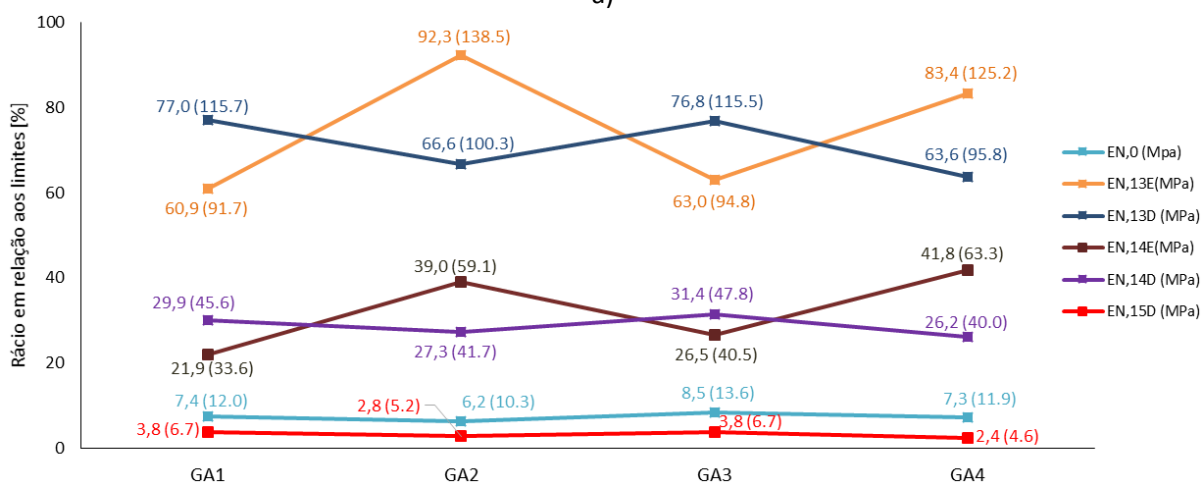


Figura 5.17 — Valores da função objetivo para os casos de otimização GA1 a GA4.

Na Figura 5.18 são apresentados os rácios dos parâmetros numéricos em relação aos limites indicados no Quadro 5.5 para os casos de otimização GA1 a GA4. Os parâmetros foram divididos em dois grupos: i) parâmetros globais e das interfaces entre os degraus (Figura 5.18a), e ii) parâmetros das interfaces dos degraus com as vigas de bancada (Figura 5.18b).



a)



b)

Figura 5.18 — Valores dos parâmetros numéricos obtidos para os casos de otimização GA1 a GA4: a) parâmetros globais e das interfaces entre os degraus; b) parâmetros das interfaces dos degraus com as vigas de bancada.

Os resultados permitem constatar que o parâmetro mais sensível, o módulo de elasticidade do neoprene dos apoios dos restantes degraus, e do apoio direito do degrau da fila 15 ($E_{N,0}$ e $E_{N,15D}$), foram aqueles que apresentaram variações mais baixas e próximas de 3%. O módulo de elasticidade do EPDM na ligação flexível entre degraus (E_{EPDM}) também apresenta variações baixas, na ordem de 3%, possivelmente devido ao fato de possuir correlações com várias das respostas modais. Relativamente

ao módulo de elasticidade do betão (E_c) e ao módulo de elasticidade do aço do conetor M20 na ligação entre degraus (E_{M20}), que são parâmetros menos sensíveis às respostas, as estimativas apresentam variações superiores e próximas de 25 %.

Em relação ao módulo de elasticidade do neoprene do apoio da fila 13, dos lados esquerdo (E_{N13L}) e direito (E_{N13R}), as estimativas apresentam variações com uma tendência contrária, ou seja, o aumento da rigidez do apoio esquerdo está normalmente associado a uma diminuição da rigidez do apoio direito e vice-versa. O mesmo sucede com o módulo de elasticidade do neoprene do apoio da fila 14, dos lados esquerdo (E_{N14L}) e direito (E_{N14R}). Tal deverá estar relacionado com o facto de existirem diferentes combinações destes conjuntos de parâmetros que conduzem à mesma solução em termos de otimização do problema.

Os valores do módulo de elasticidade equivalente da ligação flexível em EPDM situaram-se no intervalo [14,4 - 17,7] MPa, o qual comprova a elevada flexibilidade na ligação entre os degraus.

O valor ótimo do módulo de elasticidade do betão, que varia entre 28,62 GPa e 30,61 GPa, é inferior em cerca de 20 % em relação ao valor adotado no modelo inicial. A elevada porosidade do betão dos degraus de bancada indicava um valor do módulo de elasticidade inferior ao valor do betão previsto em projeto. Os resultados do ensaio de ultra-sons apresentado permitiu confirmar essa tendência. Assim, a classe de resistência real do betão dos degraus, inicialmente correspondente a uma classe C30/37, determinada em laboratório durante o processo de fabrico, corresponderá agora a uma classe C16/20, para o caso de otimização GA3.

Relativamente ao módulo de elasticidade do aço do conetor M20 da ligação entre degraus (E_{M20}) foram obtidos valores no intervalo [223,4 – 248,1] GPa, o que indicia a previsível influência da argamassa de elevada resistência que envolve o conetor M20 na rigidez da ligação.

Na Figura 5.19 são apresentados os rácios dos valores das frequências numéricas e experimentais, expressos em percentagem (Figura 5.19a), e os valores dos parâmetros MAC (Figura 5.19b), para os casos de otimização GA1 a GA4.

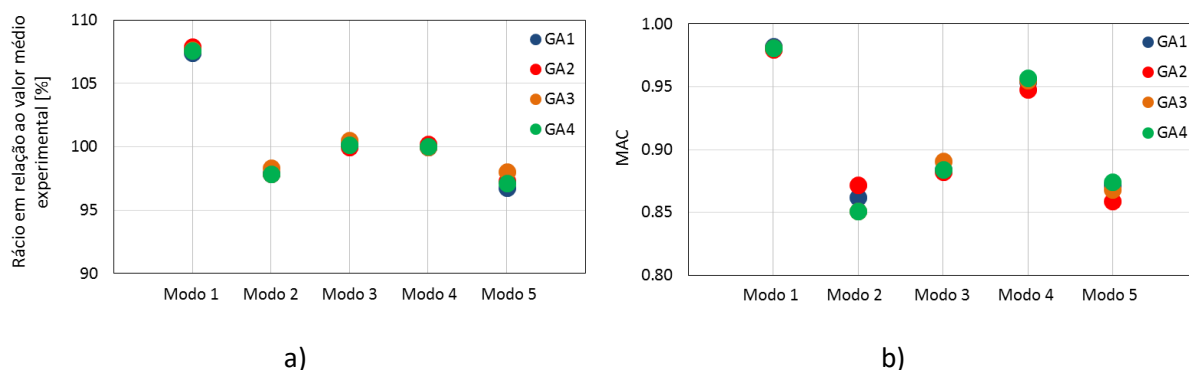


Figura 5.19 — Valores das respostas obtidas para os casos de otimização GA1 a GA4: a) rácios percentuais entre as frequências numéricas e experimentais; b) parâmetros MAC.

É possível constatar que a variação das frequências vibração é inferior a 5 % em todos os modos de vibração. As maiores diferenças foram registadas para o caso de otimização GA3, conforme se pode constatar na Figura 5.19a. Relativamente aos parâmetros MAC verifica-se que apresentam valores superiores a 0,85, destacando-se o modo 1 com valores próximos a 0,98 e o modo 4 com valores na ordem de 0,95. Verifica-se ainda que os resultados obtidos com base nos diferentes casos de otimização, tanto ao nível de frequências de vibração como de valores dos parâmetros MAC, são próximos, comprovando a robustez do algoritmo genético.

Na Figura 5.20 são apresentados os desvios das frequências de vibração numéricas obtidas para os casos de otimização GA1 a GA4, em relação ao valor médio das frequências de vibração experimentais.

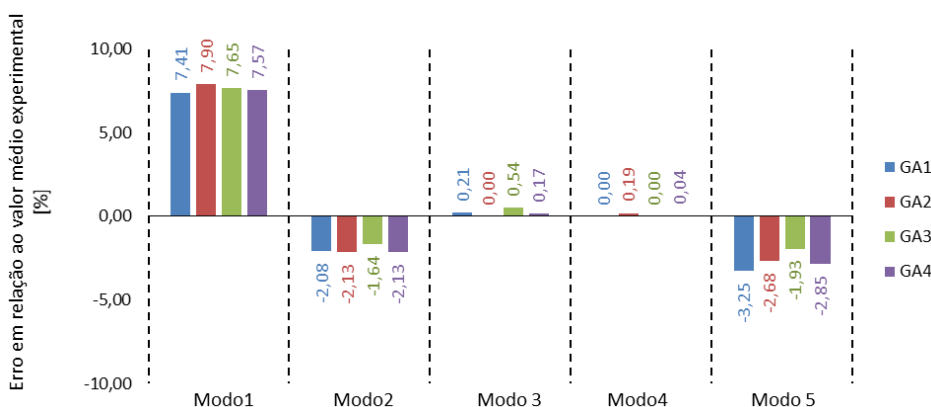


Figura 5.20 — Desvios das frequências de vibração numéricas obtidas, em relação ao valor médio das frequências de vibração experimentais, para os casos de otimização GA1 a GA4.

Verifica-se que o primeiro modo de vibração é o que apresenta o maior desvio entre as frequências de vibração numéricas e experimentais, com um valor que varia entre 7,4 % e 7,9 %. Os restantes modos,

na sua generalidade, apresentam desvios inferiores a 5%, havendo casos com desvios inferiores a 0,5 %, como é o caso dos modos de vibração 3 e 4.

5.3.5 Análise comparativa dos parâmetros modais antes e após a calibração

Na Figura 5.21a apresentam-se os valores das frequências de vibração experimentais e numéricas, antes e após a calibração, com a indicação dos valores dos erros das frequências, tomando como referência os valores das frequências experimentais. Os resultados numéricos após a calibração dizem respeito ao caso de otimização GA3, que foi o caso que apresentou o menor resíduo da função objetivo. Na Figura 5.21b são apresentados os valores do parâmetro MAC, antes e após a calibração.

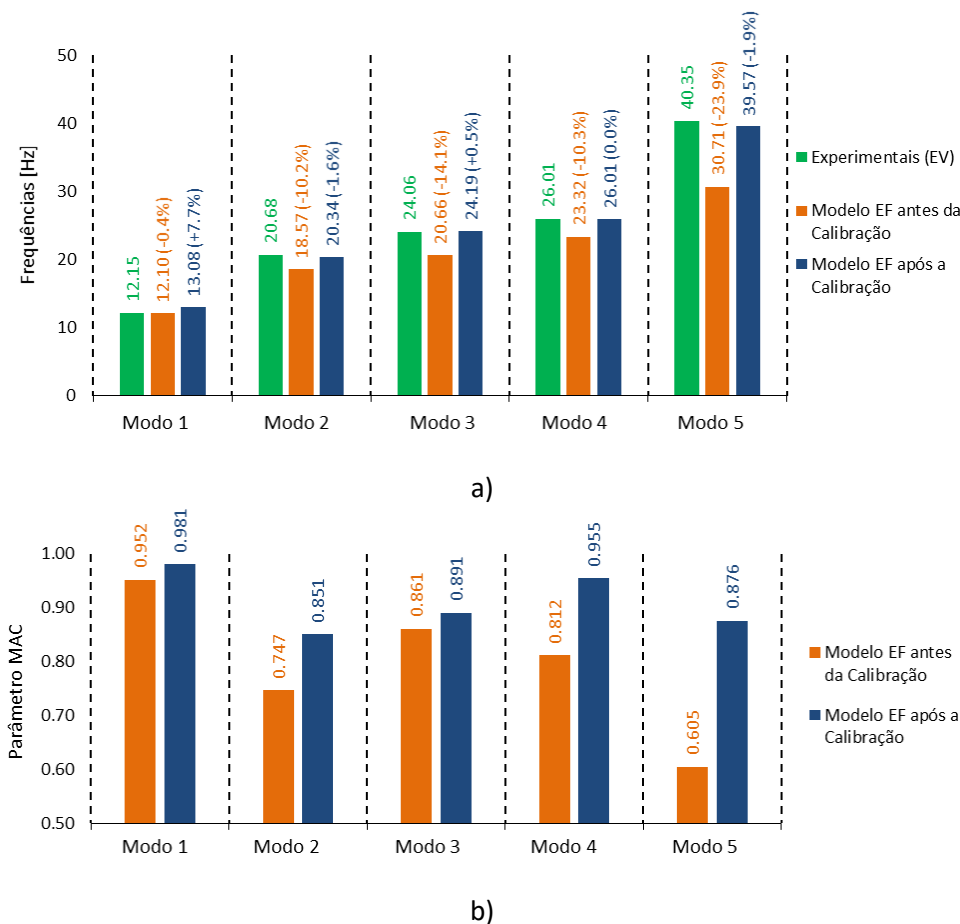


Figura 5.21 — Parâmetros modais antes e após a calibração: a) frequências de vibração; b) parâmetro MAC.

Os resultados permitem verificar uma muito boa aproximação aos valores experimentais após a otimização e para a globalidade dos modos, quer em termos de frequências quer em valores do parâmetro MAC. É evidente uma importante melhoria na aproximação da frequência do modo de vibração 5, assim como para os valores do parâmetro MAC, de todos os modos de vibração.

Na Figura 5.22 apresentam-se os valores dos erros das frequências de vibração numéricas antes e após a calibração, em relação aos valores médios das frequências de vibração experimentais.

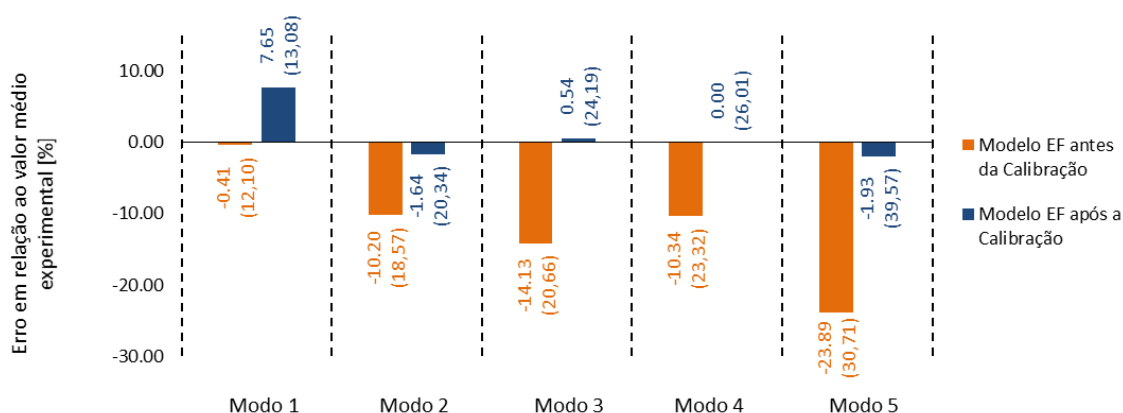


Figura 5.22 — Desvio das frequências de vibração numéricas antes e após a calibração, em relação ao valor médio das frequências experimentais.

Da análise dos resultados é possível constatar uma melhoria significativa do modelo após calibração em relação ao modelo inicial. No entanto a minimização dos valores das frequências do modo de vibração 1 não foi completamente conseguido, o que poderá estar relacionado com a técnica de emparelhamento modal utilizada no processo de otimização imposta pelas restrições do programa de dimensionamento estrutural utilizado. O erro médio das frequências passou de 11,8 % antes da calibração, para 2,4 % após a calibração, para o qual muito contribuiu a redução do erro associado às frequências dos modos de vibração 2, 3, 4 e 5.

Relativamente ao modo de vibração 1 a frequência passou de 12,10 Hz, antes da calibração para 13,08 Hz, após a calibração, o que se representa um aumento da diferença em relação à frequência de vibração experimental de 0,93 Hz. Por outro lado valor do parâmetro MAC do modo de vibração 1 melhorou de 0,952, antes da calibração para 0,981, após a calibração.

A frequência do modo de vibração 2 e 5 variaram de 18,57 Hz e 30,71 Hz, antes da calibração, para 20,38 Hz e 39,57 Hz, após a calibração, reduzindo o desvio relativamente ao valor experimental em 11,8 % e 22,0 %, respetivamente. O valor de MAC aumentou consideravelmente, passando de 0,747 e 0,605, antes da calibração, para 0,851 e 0,876, após a calibração, respetivamente para os modos 2 e 5.

No que se refere aos modos 3 e 4, as frequências de vibração passaram de 20,66 Hz, 23,32 Hz antes da calibração, para 24,19 Hz e 26,01 Hz após a calibração, reduzindo o desvio relativamente ao valor

inicial em 13,6 % e 10,3 %, respetivamente. Relativamente aos valores do parâmetro MAC, verifica-se uma melhoria generalizada de todos os valores, passando de 0,861 e 0,801, para 0,891 e 0,955, após a calibração, respetivamente para os modos 3 e 4.

O valor de MAC médio passou de 0,795, antes da calibração, para 0,911, após a calibração.

Na Figura 5.23 apresenta-se a comparação das configurações modais dos degraus das filas 13, 14 e 15 da bancada sul, obtidos por via experimental e numérica após a calibração.

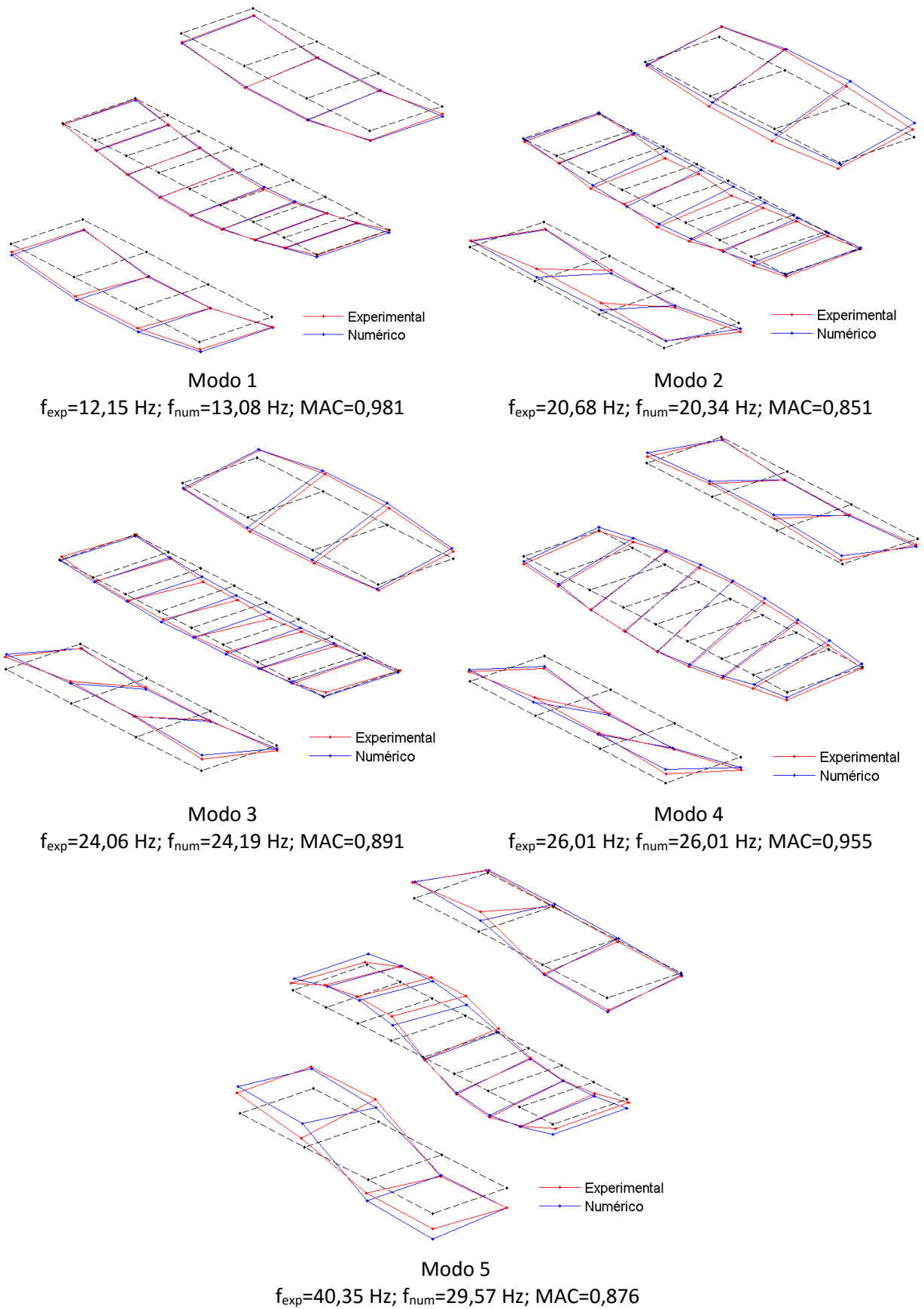


Figura 5.23 — Configurações modais experimentais e numéricas antes da calibração.

5.3.6 Análise de robustez dos operadores do algoritmo genético

Nesta secção é avaliada a influência de alguns operadores do algoritmo genético na robustez e estabilidade da solução ótima para a calibração do modelo numérico dos degraus de bancada. Em particular, será avaliada a influência da atribuição de pesos aos resíduos da função objetivo, da taxa de substituição e da taxa de cruzamento.

5.3.6.1 Pesos nos resíduos da função objetivo

Neste ponto é avaliada a robustez do algoritmo genético em relação a diferentes pesos dos resíduos das frequências e dos parâmetros MAC da função objetivo. Para o efeito foram considerados dois cenários distintos (C1 e C2): no primeiro cenário, C1, foi considerado um peso no resíduo das frequências igual a 5 e um peso do resíduo dos parâmetros MAC igual a 1,0; no segundo cenário, C2, foi considerado um peso no resíduo das frequências com um valor unitário e um peso do resíduo dos parâmetros MAC igual a 5. Os valores das respostas obtidas para estes dois cenários são comparados com os resultados do caso de otimização GA3, o qual correspondeu ao valor da função objetivo com menor resíduo.

Na Figura 5.24 são apresentados os valores da função objetivo e dos resíduos das frequências e dos parâmetros MAC, para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2. Na análise dos resíduos das funções objetivo constata-se que os resíduos das frequências e dos parâmetros MAC no cenário C1, obteve piores resultados comparativamente ao caso de otimização GA3, com uma diferença de 13,5 % e 22,5 %, respetivamente. Relativamente ao cenário C2, verifica-se que o resíduo dos parâmetros MAC melhorou cerca de 17,6 %, mas por outro lado piorou bastante o resíduo das frequências.

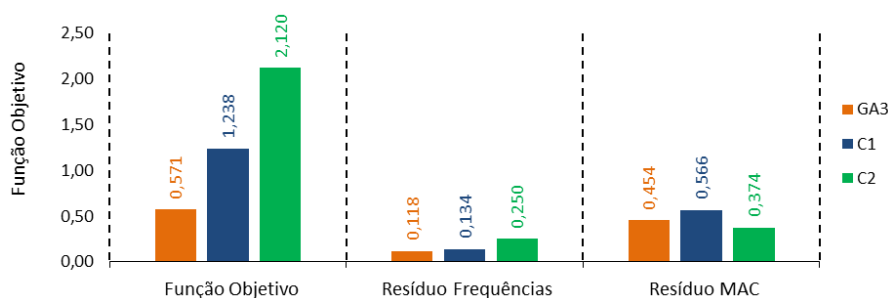


Figura 5.24 — Valores da função objetivo para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2.

Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos para as frequências de vibração numéricas (Figura 5.25a), e para os parâmetros MAC (Figura 5.25b), para o caso de otimização GA3 e para os

cenários C1 e C2. Os valores das frequências de vibração numéricas são comparadas com as frequências de vibração experimentais.

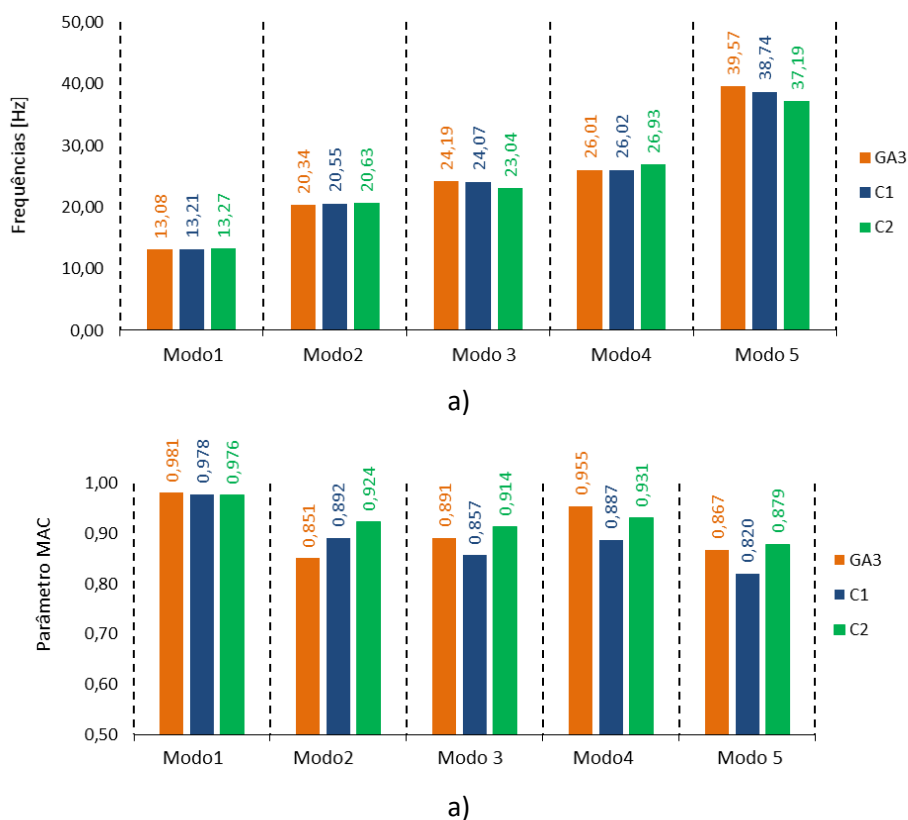


Figura 5.25 — Resultados modais para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2: a) frequências de vibração; b) parâmetros MAC.

Na análise dos resultados verifica-se que as frequências nos modos 1, 2, 3 e 4 apresentam valores muito aproximados, com exceção do modo 5 para o qual as frequências apresentam diferenças mais significativas. Relativamente aos parâmetros MAC, a atribuição de um peso menor ao resíduo das frequências (cenário C1) teve como consequência a melhoria dos valores do modo 2, mas por outro lado os valores dos modos 3, 4 e 5, apresentam uma diminuição. Quanto ao cenário C2, onde se atribuíram maior peso ao resíduo dos parâmetros MAC, obtiveram-se resultados melhores do parâmetro MAC dos modos 2, 3, 4 e 5. Quanto ao modo 1, o valor do parâmetro MAC mantém-se estável para os dois cenários apresentados.

Na Figura 5.26 apresentam-se os valores dos erros das frequências de vibração numéricas para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2, em relação aos valores médios das frequências de vibração experimentais.

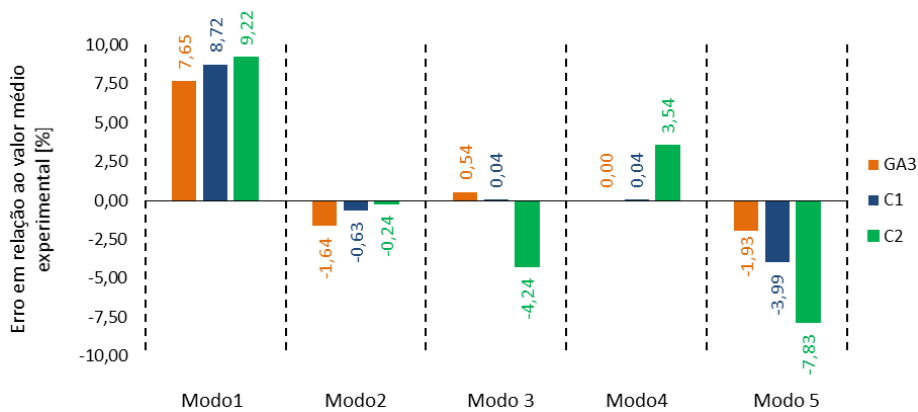


Figura 5.26 — Desvio das frequências de vibração numéricas, em relação ao valor médio das frequências experimentais, para o caso de otimização GA3 e para os cenários C1 e C2.

Da análise dos resultados das frequências de vibração é possível verificar que o caso de otimização GA3 apresenta melhores resultados comparativamente aos cenários C1 e C2. Os cenários C1 e C2, apresentam um erro médio das frequências de 2,7 % e 5,0 %, em relação ao valor médio das frequências experimentais. Por outro lado o caso de otimização GA3 apresenta um erro médio das frequências igual a 2,4 %.

Relativamente aos resultados dos parâmetros MAC, verifica-se que o caso de otimização GA3 apresenta um valor médio de 0,909, o cenário C1, um valor médio de 0,887, e o cenário C2, um valor médio de 0,925. Neste caso, o cenário C2 é o que apresenta os melhores resultados, o que é de certo modo expectável uma vez que o peso do resíduo do parâmetro MAC é cinco vezes superior ao peso do resíduo das frequências.

A utilização de pesos unitários nos resíduos das frequências e nos resíduos dos parâmetros MAC da função objetivo considerada no processo de calibração do modelo numérico, revelou ser a melhor opção tendo em vista a obtenção da solução ótima.

5.3.6.2 Taxa de substituição

Na Figura 5.27 apresenta-se a evolução dos valores da função objetivo e dos nove parâmetros de calibração, em função da taxa de substituição e do número de gerações. Este operador é na realidade um sub-operador do operador substituição, o qual controla o número de indivíduos selecionados de gerações anteriores a serem utilizados na geração atual (ver Capítulo 3, Secção 3.4.3). A análise foi realizada considerando três valores de taxa de substituição: 5 % dos indivíduos da geração (2

indivíduos); 10 % dos indivíduos da geração (3 indivíduos); 20 % dos indivíduos da geração (6 indivíduos).

A observação dos gráficos da evolução da função objetivo e dos parâmetros de calibração, permite constatar que a solução ótima foi atingida para a generalidade dos parâmetros para uma taxa de substituição de 5 %. A função objetivo também apresenta uma melhor convergência para a taxa de substituição de 5 %, cujo melhor indivíduo começou a estabilizar à 20ª geração (Figura 5.27a).

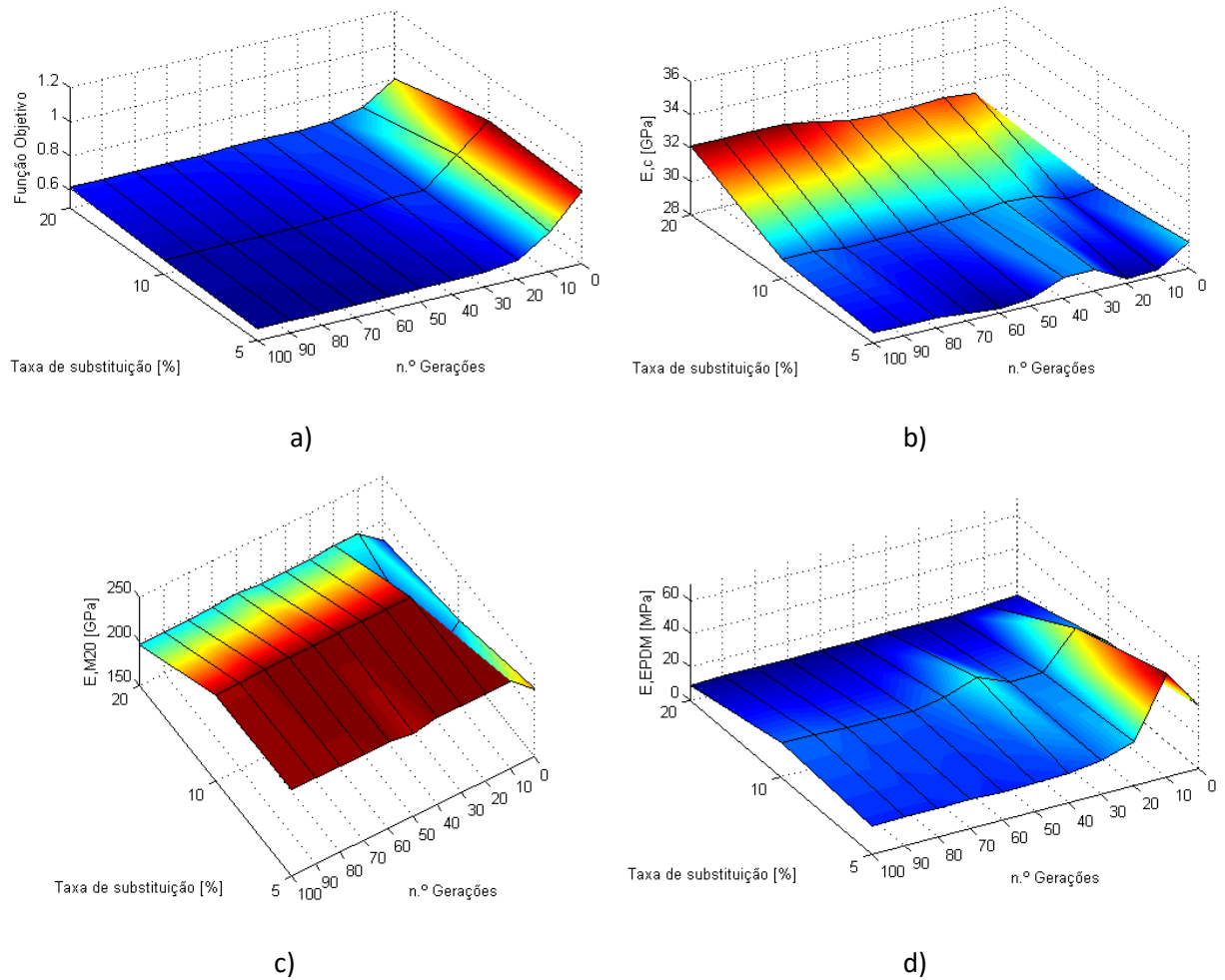


Figura 5.27 — Evolução da função objetivo e dos parâmetros em função da taxa de substituição e do número de gerações: a) função objetivo; b) E_c ; c) E_{M20} ; d) E_{EPDM} ; e) $E_{N,0}$; f) $E_{N,13E}$; g) $E_{N,13D}$; h) $E_{N,14E}$; i) $E_{N,14D}$; j) $E_{N,15D}$.

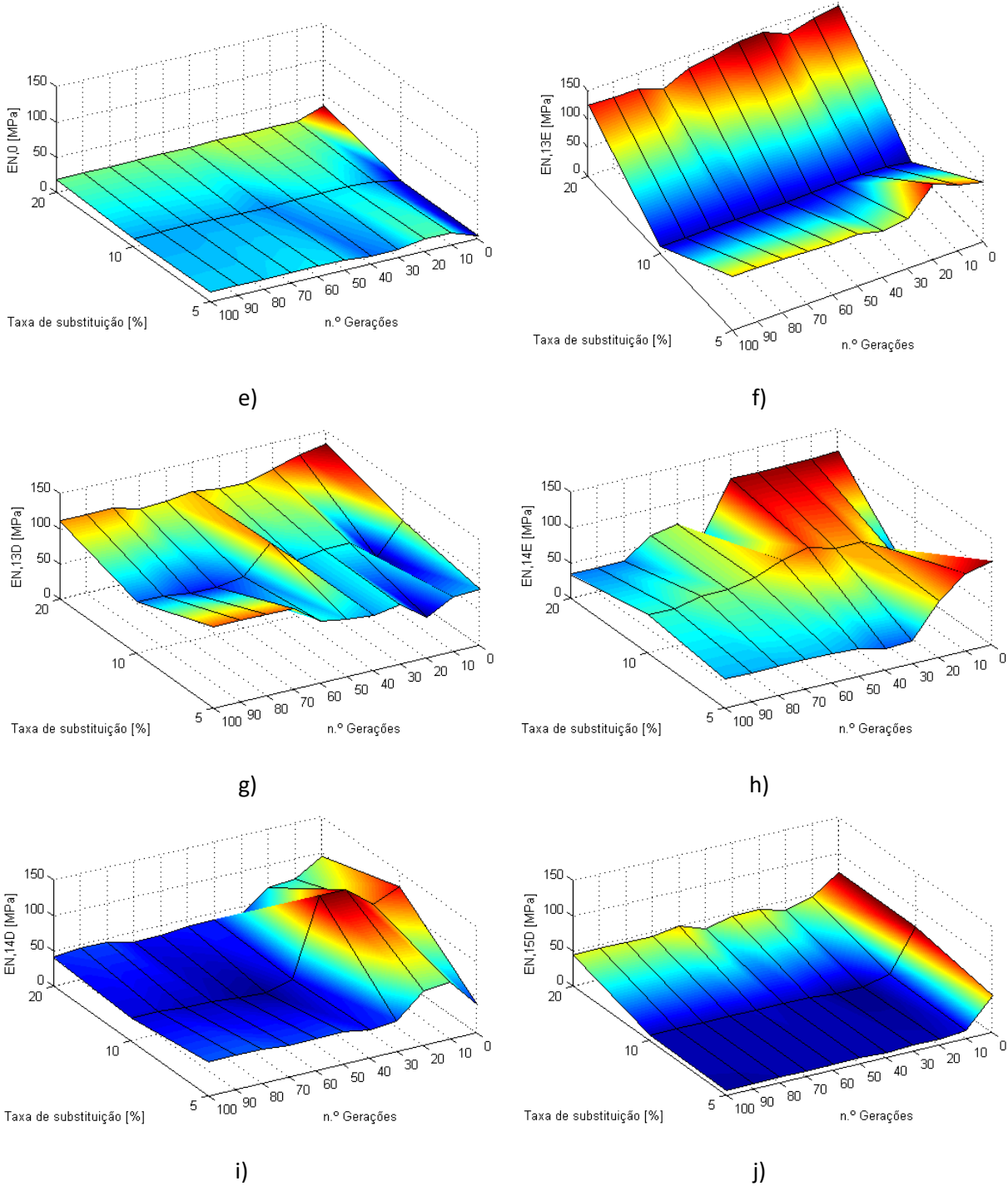


Figura 5.27 (continuação) — Evolução da função objetivo e dos parâmetros em função da taxa de substituição e do número de gerações: a) função objetivo; b) E_c ; c) E_{M20} ; d) E_{EPDM} ; e) $E_{N,0}$; f) $E_{N,13E}$; g) $E_{N,13D}$; h) $E_{N,14E}$; i) $E_{N,14D}$; j) $E_{N,15D}$.

5.3.6.3 Taxa de cruzamento

Na Figura 5.28 apresenta-se a evolução dos valores da função objetivo e dos nove parâmetros de calibração, em função da taxa de cruzamento e do número de gerações. A observação da figura permite constatar que a solução ótima foi atingida para a taxa de cruzamento entre 50 % e 60 %, podendo verificar-se que nos parâmetros mais sensíveis, como é o caso do módulo de elasticidade do betão (Figura 5.28b), e o módulo de elasticidade do neoprene nas ligações entre os degraus e as vigas de bancada dos outros apoios ($E_{N,0}$) (Figura 5.28e), a solução ótima foi atingida para a taxa de cruzamento de 50 %. A função objetivo também apresenta uma melhor convergência para a taxa de cruzamento de 50 %, sendo que os valores mostraram-se estáveis a partir da 50ª geração (Figura 5.28a).

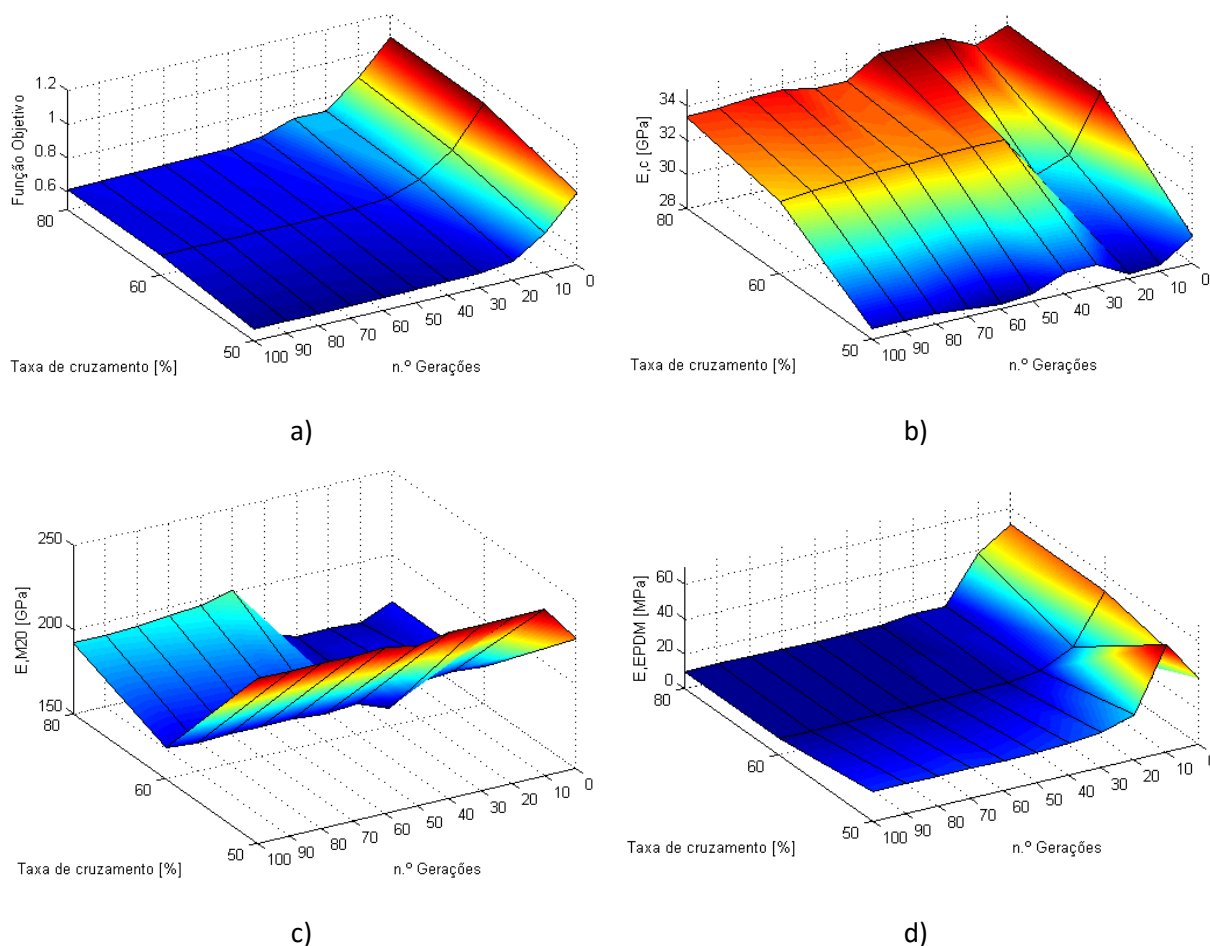
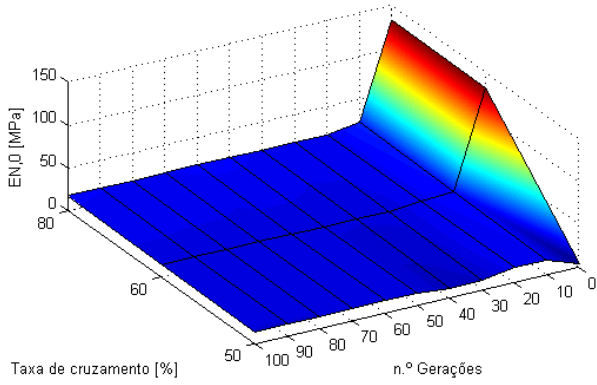
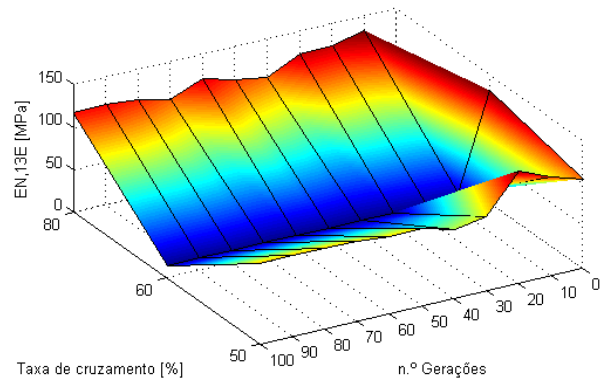


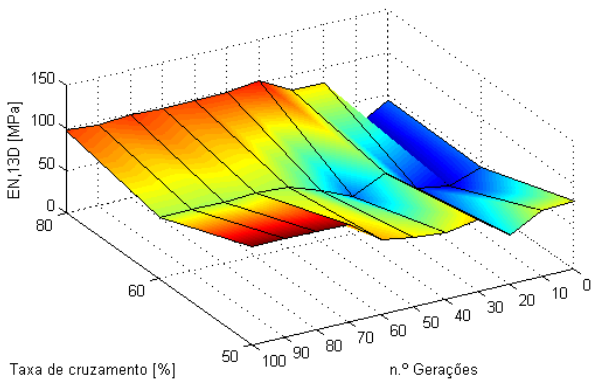
Figura 5.28 — Evolução da função objetivo e dos parâmetros em função da da taxa de cruzamento e do número de gerações: a) função objetivo; b) E_c ; c) E_{M20} ; d) E_{EPDM} ; e) $E_{N,0}$; f) $E_{N,13E}$; g) $E_{N,13D}$; h) $E_{N,14E}$; i) $E_{N,14D}$; j) $E_{N,15D}$.



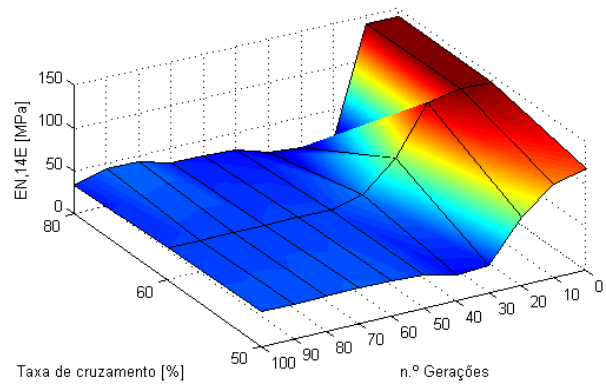
e)



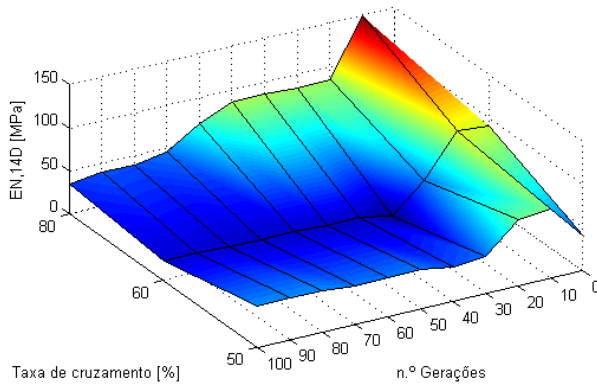
f)



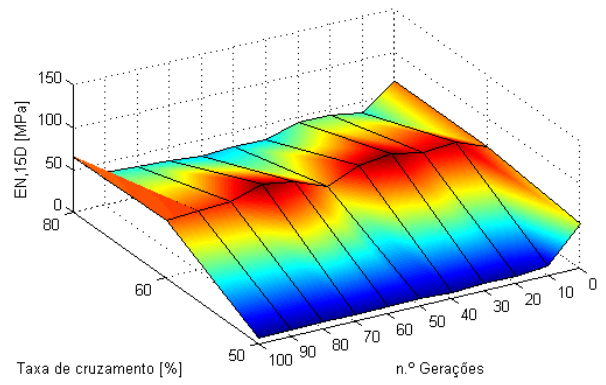
g)



h)



i)



j)

Figura 5.28 (continuação) — Evolução da função objetivo e dos parâmetros em função da taxa de cruzamento e do número de gerações: a) função objetivo; b) E_c ; c) E_{M20} ; d) E_{EPDM} ; e) $E_{N,0}$; f) $E_{N,13E}$; g) $E_{N,13D}$; h) $E_{N,14E}$; i) $E_{N,14D}$; j) $E_{N,15D}$.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação centrou-se na avaliação experimental e numérica do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão.

No Capítulo 2 foi apresentada a formulação teórica subjacente à avaliação dinâmica de estruturas no domínio da frequência que serviram de base ao entendimento das técnicas de identificação modal utilizadas no presente trabalho. Foram também apresentadas as técnicas utilizadas na realização de ensaios “*in-situ*” de caracterização dinâmica de estruturas de engenharia civil. Ainda neste capítulo foi descrita uma técnica de identificação modal estocástica no domínio da frequência que permitiu a identificação dos parâmetros modais, em particular a versão melhorada do método de decomposição no domínio da frequência (EFDD).

No Capítulo 3 foram apresentadas as metodologias de calibração experimental de modelos numéricos de elementos finitos baseada em algoritmos de otimização. Para o efeito foram abordadas as principais fases de implementação de metodologias de calibração (análise de sensibilidade, emparelhamento de modos e otimização).

Foram identificados os principais aspetos referentes às técnicas utilizadas na análise de sensibilidade, e às técnicas utilizadas no emparelhamento de modos de vibração, salientando-se a sua importância no processo de estabilidade e convergência no processo de otimização.

No que se refere à otimização foram descritas particularidades da aplicação do algoritmo genético no processo de otimização, nomeadamente, os principais operadores genéticos, o tratamento das restrições e as estratégias de otimização.

Por último, foi descrita uma implementação computacional inovadora do método iterativo desenvolvida no âmbito do presente trabalho e que recorre a uma articulação eficiente entre três programas comerciais: ROBOT (2015), Excel (2013) e MATLAB (2013). A ferramenta desenvolvida

compreendeu um conjunto de rotinas referentes à análise modal, ao emparelhamento dos modos de vibração numéricos e experimentais e à otimização.

O caso de estudo teve como foco um conjunto de degraus de bancada com um vão aproximado de 8 m, localizados na bancada inferior sul do Estádio do Dragão, situado na cidade do Porto. Para o efeito foi desenvolvido um modelo numérico constituído por 10 degraus de bancada o qual inclui os apoios dos degraus nas vigas de suporte das bancadas.

No Capítulo 4 foi apresentada a caracterização experimental do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão. Foi realizada uma inspeção visual, que antecedeu a realização de ensaios dinâmicos e ensaios de caracterização do betão aos degraus de bancada.

A inspeção visual aos degraus de bancada incidiu, sobretudo, em possíveis anomalias no betão e nos apoios dos degraus de bancada. Na inspeção visual foram possíveis identificar, essencialmente, duas situações anómalas: i) uma elevada porosidade do betão das nervuras dos degraus que é comum à generalidade dos degraus de bancada; ii) o tipo de condições de apoio apresentavam uma elevada variabilidade de degrau para degrau.

Os ensaios dinâmicos foram realizados em duas fases: a fase 1, que teve como objetivo principal a identificação das propriedades modais locais de um degrau de bancada (degrau de bancada sul da fila 14), nomeadamente as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento; e a fase 2, que incidiu na identificação modal de 10 degraus individuais, da fila 14, das bancadas norte e sul, com o objetivo de identificar as propriedades modais, nomeadamente, as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento.

Na fase 1, a identificação dos parâmetros modais, nomeadamente, as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento, foi realizada com recurso ao programa comercial ARTeMIS, por aplicação do método EFDD. Foram identificados 5 modos de vibração locais associados aos degraus de bancada, nomeadamente, o 1º modo de flexão vertical (12,15 Hz), três modos de torção (20,68 Hz, 24,06 Hz e 26,01 Hz), e o 2º modo de flexão vertical (40,35 Hz).

Para os 5 modos de vibração foram determinados os coeficientes de amortecimento (2,53 %, 1,36 %, 1,26 %, 1,26 % e 1,11 %). A análise dos valores dos coeficientes de amortecimento permitiu constatar existir uma tendência de diminuição dos seus valores com o aumento das frequências de vibração dos três primeiros modos, verificando-se depois uma tendência dos valores dos coeficientes de amortecimento tenderem a estabilizar.

A análise das configurações modais permitiu identificar modos de vibração locais que envolvem movimentos de flexão e de torção dos degraus de bancada com muito boa definição. Relativamente aos 5 modos detetados foi possível verificar que a interferência dos movimentos da estrutura de suporte dos degraus de bancada era reduzida.

Na fase 2, a identificação dos parâmetros modais, nomeadamente, as frequências naturais e modos de vibração, foi realizada com recurso ao programa comercial ARTEMIS, por aplicação do método EFDD. Foram identificadas os parâmetros modais associados ao 1º e 2º modo de flexão vertical do degrau da fila 14, dos 10 degraus de bancada estudados. Da análise dos resultados foi possível concluir que as frequências do 1º modo de flexão vertical, tem um intervalo de variação de 1,35 Hz, comparativamente aos 5,82 Hz para o 2º modo flexão vertical. Por outro lado os valores das frequências do 1º modo de flexão vertical dos degraus da bancada norte são inferiores aos registados nos degraus da bancada sul. Foi possível também verificar que as frequências do 2º modo flexão vertical, apresentam uma maior variabilidade e aleatoriedade de distribuição comparativamente às frequências do 1º modo flexão vertical.

Os coeficientes de amortecimento foram determinados com base na aplicação do método do decremento logarítmico. Foram selecionadas duas zonas do registo em vibração livre após o evento (zona 1 e zona 2). Os valores calculados para a zona 1 apresentaram um valor médio de 4,901 %. Relativamente aos valores dos coeficientes de amortecimento calculados considerando a zona 2, resultando num valor médio de 2,846 %.

Foram realizados ensaios de caracterização do betão com recurso à técnica de ultra-sons em 10 pares de pontos de medição de 4 degraus da bancada sul, mais precisamente nas nervuras dos degraus das filas 14 e 15. Os resultados revelaram que a estimativa do módulo de elasticidade do betão conduziu a um valor médio de 32,22 GPa inferior ao valor calculado para um betão da classe C30/37 à data da campanha experimental, ou seja, 35,81 GPa.

No Capítulo 5 é descrita a modelação numérica e a calibração experimental dos degraus de bancada das bancadas do Estádio do Dragão com base em parâmetros modais.

O modelo de elementos finitos dos degraus de bancada foi desenvolvido com recurso ao programa Autodesk ROBOT. O modelo tridimensional de elementos finitos compreendeu um conjunto de 10 degraus de bancada.

Os resultados da análise modal do modelo numérico para os primeiros vinte e cinco modos de vibração eram predominantemente de dois tipos: flexão vertical e torção. Em alguns modos verificou-se o acoplamento entre movimentos de flexão vertical/transversal e de torção dos degraus. Foi também possível verificar que a gama de frequências dos primeiros vinte e cinco modos de vibração estava compreendida entre os valores 10,01 Hz e 38,18 Hz.

Foi realizada uma análise paramétrica da influência do número de degraus a considerar no modelo numérico com influência nas respostas modais, tendo sido analisados 16 modelos cujos números de degraus variaram de 3 a 18 degraus. Concluiu-se que o modelo com 18 degraus correspondia ao modelo cujas respostas numéricas mais se aproximaram das respostas experimentais. No entanto o modelo com 10 degraus foi aquele cujos resultados mais se aproximaram do modelo de 18 degraus, face às condições de fronteira presentes nos dois modelos.

De forma a identificar os parâmetros mais influentes no comportamento dinâmico dos degraus de bancada foi realizada uma análise de sensibilidade. Os valores dos parâmetros e respetivos intervalos de variação foram fundamentados na regulamentação em vigor e nos casos omissos recorreu-se à bibliografia da especialidade. Foram definidos 18 parâmetros numéricos que poderiam ser alvo de otimização.

A análise de sensibilidade foi realizada com recurso a uma técnica de amostragem estocástica baseada em 1000 amostras geradas pelo método do Hipercubo Latino, verificando-se, com base na matriz de correlação de Spearman, que apenas 9 dos 18 parâmetros numéricos seriam selecionados, e os restantes seriam excluídos da fase de otimização.

A otimização do modelo numérico dos degraus de bancada envolveu 9 parâmetros numéricos: módulo de elasticidade do betão (E_c), módulo de elasticidade do aço do conetor na ligação entre degraus (E_{M20}), módulo de elasticidade do EPDM na ligação entre degraus (E_{EPDM}), módulos de elasticidade do neoprene nos apoios dos degraus nas vigas de bancada ($E_{N,0}$, $E_{N,13E}$, $E_{N,13D}$, $E_{N,14E}$, $E_{N,14D}$, $E_{N,15D}$), além de 10 respostas modais (5 frequências e 5 parâmetros MAC). O algoritmo genético baseou-se numa população inicial constituída por 30 indivíduos gerada aleatoriamente através do método do Hipercubo Latino e compreendeu 100 gerações, num total de 3000 indivíduos.

Foram realizados quatro casos de otimização (GA1 a GA4), em condições iniciais idênticas, de modo a avaliar a robustez e estabilidade da solução ótima, concluindo-se que os resultados foram semelhantes para todos os casos, sendo que o caso de otimização mais favorável foi o GA3. Da análise dos resultados

pôde-se concluir que a evolução dos valores mínimos da função objetivo apresentaram algumas tendências diferenciadas nas primeiras gerações do processo de otimização, e depois tenderam a evoluir de forma bastante convergente e aproximada até ao valor mínimo ser atingido.

Foi também concluído que os parâmetros mais sensíveis apresentaram variações mais baixas e próximas de 3 %, caso do módulo de elasticidade do neoprene dos apoios dos restantes degraus, e do apoio direito do degrau da fila 15 ($E_{N,0}$ e $E_{N,15D}$). O módulo de elasticidade do EPDM na ligação flexível entre degraus (E_{EPDM}) também apresentou variações baixas, na ordem de 3 %. Relativamente ao módulo de elasticidade do betão (E_c) e ao módulo de elasticidade do aço do conector M20 na ligação entre degraus (E_{M20}), que são parâmetros menos sensíveis às respostas, em que as estimativas apresentaram variações superiores e próximas de 25 %.

As estimativas do módulo de elasticidade do neoprene do apoio da fila 13, dos lados esquerdo (E_{N13L}) e direito (E_{N13R}), apresentaram variações com uma tendência contrária, ou seja, o aumento da rigidez do apoio esquerdo está normalmente associado a uma diminuição da rigidez do apoio direito e vice-versa. O mesmo sucedeu com o módulo de elasticidade do neoprene do apoio da fila 14, dos lados esquerdo (E_{N14L}) e direito (E_{N14R}). Concluiu-se que esta constatação deverá estar relacionado com o facto de existirem diferentes combinações destes conjuntos de parâmetros que conduzem à mesma solução em termos de otimização do problema.

Concluiu-se que os valores do módulo de elasticidade equivalente da ligação flexível em EPDM situaram-se no intervalo [14,4 - 17,7] MPa, comprovando a elevada flexibilidade na ligação entre os degraus.

Concluiu-se também que o valor ótimo do módulo de elasticidade do betão, que varia entre 28,62 GPa e 30,61 GPa, é inferior em cerca de 20 % em relação ao valor adotado no modelo inicial, comprovando que a elevada porosidade do betão dos degraus de bancada indicava um valor do módulo de elasticidade inferior ao valor do betão previsto em projeto, cuja tendência foi comprovada pelo ensaio de ultra-sons realizado.

Foi ainda concluído que para o módulo de elasticidade do aço do conector M20 da ligação entre degraus (E_{M20}) foram obtidos valores no intervalo [223,4 – 248,1] GPa, o que indicou a previsível influência da argamassa de elevada resistência que envolve o conector M20 na rigidez da ligação.

Foi realizada a comparação dos resultados dos parâmetros modais, nomeadamente, frequências de vibração experimentais e numéricas, e modos de vibração, antes e após a calibração. Concluiu-se que

erro médio das frequências passou de 11,8 % antes da calibração, para 2,4 % após a calibração. O valor de MAC médio passou de 0,795, antes da calibração, para 0,911, após a calibração.

Por último, ainda no capítulo 5, foi avaliada a influência de alguns operadores do algoritmo genético, nomeadamente, a atribuição de pesos aos resíduos da função objetivo, taxa de substituição e taxa de cruzamento, na robustez e estabilidade da solução ótima para a calibração do modelo numérico dos degraus de bancada.

Concluiu-se que a utilização de pesos unitários nos resíduos das frequências e nos resíduos dos parâmetros MAC da função objetivo considerada no processo de calibração do modelo numérico, revelou ser a melhor opção tendo em vista a obtenção da solução ótima. Relativamente à taxa de substituição, a solução ótima foi atingida para a generalidade dos parâmetros para uma taxa de substituição de 5 %. Quanto à taxa de cruzamento a solução ótima foi atingida para a taxa de cruzamento entre 50 % e 60 %, verificando-se que nos parâmetros mais sensíveis a solução ótima foi atingida para a taxa de cruzamento de 50 %.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na realização do presente trabalho foram surgindo assuntos e conclusões que mereciam ser alvo de investigações futuras.

Assim sendo, apresentam-se alguns aspetos que se consideram alvo de possíveis desenvolvimentos complementares ao presente estudo:

- Face às limitações identificadas no programa Autodesk ROBOT relativamente à limitação de importação de resultados, seria importante que nas versões futuras fosse implementadas funcionalidades que permitissem a extração das matrizes de massa e de rigidez do modelo numérico de elementos finitos, cuja informação é relevante para a calibração experimental de estruturas.
- Seria particularmente importante realizar, no processo de calibração, o emparelhamento de modos com recurso a técnicas mais robustas e eficientes, como é o caso do parâmetro EMAC, permitindo assim reduzir algumas incertezas identificadas no emparelhamento de alguns modos.

- Os algoritmos genéticos utilizados deveriam merecer uma investigação mais profunda de modo a reduzir as limitações impostas pelo programa MATLAB na consideração de alguns dos operadores.
- Outro aspeto de elevada importância seria realizar a validação do modelo numérico dos degraus de bancada sob ação de movimentos controlados de público com base na implementação de análises dinâmicas que incluam a interação público-estrutura e que atendam a eventuais não linearidades do sistema dinâmico.
- Por último, o estudo dos degraus de bancada deveria ser alargado a outras zonas do estádio, como é o caso das arquibancadas existentes nas bancadas nascente e poente, onde os corpos em consola terão, com toda a certeza, uma elevada influência no seu comportamento dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Allemang, R. J.; Brown, D. L. - A correlation coefficient for modal vector analysis. First International Modal Analysis Conference. 1982. 110–116.

Allemang, Randall J. - The Modal Assurance Criterion Twenty - Years of Use and Abuse. Journal of Sound and Vibration. 37 (8):August (2003) 14–21.

AUTODESK, Inc - Autodesk Robot Structural Analysis 2013 - Getting Started Guide - Robot API.

B

Bahiano, Futebol - http://www.campeoesdofutebol.com.br/estadio_fonte_nova.html, atual. 2007.

Bamforth, P; Crisholm, D.; Gibbs, J.; Harrison, T - Properties of Concrete for use in Eurocode 2. Surrey, UK : T. Center.

Brehm, Maik - Vibration-based model updating: Reduction and quantification of uncertainties. Dissertation : Bauhaus - Universitat Weimar. 2011.

Brehm, Maik; Zabel, Volkmar; Bucher, Christian - An automatic mode pairing strategy using an enhanced modal assurance criterion based on modal strain energies. Journal of Sound and Vibration. . ISSN 0022460X. 329:25 (2010) 5375–5392. doi: 10.1016/j.jsv.2010.07.006.

Brehm, Maik; Zabel, Volkmar; Unger, Jörg F. - Stochastic Model Updating Using Perturbation Methods Combined With Neural Network Estimations. 27th International Modal Analysis Conference (IMAC

XXVII). 2009.

Brinker, R.; Ventura, C. E.; Andersen, P. - Damping estimation by frequency domain decomposition. Time. . ISSN 10466770. 1:2001. 698–703.

Brito, Valkisfran Lira De; Pena, Andrea Nataly; Pimentel, Roberto Leal; Brito, Jose Luis Vital de - Modal Tests and Model Updating for Vibration Analysis of Temporary Grandstand. Advances in Structural Engineering. . ISSN 1369-4332. 17:5 (2014) 721–734.

BS 1881 - Testing concrete — Part 3: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London. 1986.

BS 6841 - Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. 1987.

C

Caetano, Elsa; Cunha, Alvaro; Magalhães, Filipe - Novas perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. . ISSN 1646-70. 18:2010. 23–34.

Caetano, Elsa; Cunha, Alvaro; Magalhães, Filipe - Ensaio Dinâmico de Degraus das Bancadas do Estádio do Dragão (EURO'2004).

Caetano, Elsa - Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais. Tese de Mestrado : FEUP. 1992

Caprioli, A; Reynolds, P; Vanali, M; Zappa, E - Comparison of the effects of a moving crowd on different grandstands during similar events. 2006. 1–9.

Caprioli, Alessandro; Vanali, Marcello; Dipartimento, Milano; Masa, Via La- Comparison of different serviceability assessment measures for different events held in the G . Meazza Stadium in Milano. Imac-Xxvii. October (2009) 10.

Catbas, F. Necati; Gul, Mustafa; Sazak, H.Ozerk - Dynamic Testing and Analysis of a Football Stadium. Experimental Mechanics. 2010.

Cigada, A.; Caprioli, A.; Redaelli, M.; Vanali, M. - Vibration Testing at Meazza Stadium: Reliability of Operational Modal Analysis to Health Monitoring Purposes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. . ISSN 0887-3828@e1943-5509. 22:4 (2008) 228–237. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(228).

Cigada, Alfredo; CAPRIOLI, Alessandro; Redaelli, Matteo - Numerical Modeling and Experimental Modal Analysis of a Concrete Grand-stand Structure to Structural Health Monitoring Purposes. Em *Proceedings of the international conference IMAC XXVI*. Orlando, USA. 2009

Correia, M. - Algoritmos genéticos. *Revista dos Algarves*. 2003. 36–43.

E

Ellis, B. R.; Ji, T. - Human-structure interaction in vertical vibrations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and buildings*. Vol. 122:1 (1997) 1–9.

Ellis, B. R.; Ji, T.; Littler, J. - The response of grandstands to dynamic crowd loads. *The Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol 140:4 (2000) 355–365.

Ewins, D. J. - Model validation: Correlation for updating. *Sadhana*. . ISSN 0256-2499. 25:3 (2000) 221–234. doi: 10.1007/BF02703541.

F

Figueiras, Helena; Félix, Carlos; Figueiras, Joaquim - Ensaio de Degraus Pré-Fabricados Constituído Bancadas do Estádio do Dragão. FEUP. 2004.

Friswell, M. I.; Mottershead, J. E. - Finite element model updating in structural dynamics. *Solid mechanics and its applications*. 1995.

G

GEG - Projeto de execução da Estrutura do estádio do Dragão. Porto, Portugal. 2002.

Gomes, H. M.; Silva, N. R. S. - Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method. *Applied Mathematical Modelling*. . ISSN 0307904X. 32:11

(2008) 2216–2232. doi: 10.1016/j.apm.2007.07.002.

Greimann, L. F.; Klaiber, F. W. - Dynamic Forces Induced by Spectators. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 1:1978. 348–351.

H

Henriques, António - *Aplicação de Novos Conceitos de Segurança no Dimensionamento do Betão Estrutural*. FEUP. 1998.

HILTI - Sistema portátil de deteção de armadura em betão [Em linha], atual. 2016. [Consult. 1 jan. 2016]. Disponível em WWW:<URL:https://www.hilti.pt/sistemas-de-medi??o/dete??o/2044472>.

Holland, J. H. - *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [Em linha] Disponível em WWW:<URL:http://www.citeulike.org/group/664/article/400721>. ISBN 0262581116.

I

INDIAMART - Testing & Measuring Equipments [Em linha], atual. 2016. [Consult. 12 abr. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://dir.indiamart.com/impcat/vibration-test-systems.html>.

ISO 2631-1 - Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration- Part 1:General requirements. 1997. 1–30.

ISO 2631-2 - Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). 2003.

ISTRUCTE - *Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action Interim guidance on assessment and design*. London, UK. 2001.

J

Ji, T.; Ellis, B. R. - *The evaluation of sports stadia grandstands for dynamic crowd loads at pop concerts in the United Kingdom*. Em *Structural dynamics : EURO DYN '99*. Rotterdam: Balkema. 1999.

Jones, C. A.; Reynolds, Paul; Pavic, Aleksandar - *Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review*. *Journal of Sound and Vibration*. . ISSN 0022460X. 330:8

(2011) 1531–1566. doi: 10.1016/j.jsv.2010.10.032.

Jones, Christopher A.; Pavic, Aleksandar; Reynolds, Paul; Harrison, Robert E. - Verification of equivalent mass–spring–damper models for crowd–structure vibration response prediction. *Canadian Journal of Civil Engineering*. . ISSN 0315-1468. 38:10 (2011) 1122–1135. doi: 10.1139/11-076.

K

Kasperski, M.; Niemann, H. J. - Man induced vibrations of a stand structure. Em *Proceedings of the 2nd European conference on structural dynamics: EURODYN '93*. Trondheim: Balkema. 1993.

L

Levin, Ri; Lieven, Naj - Dynamic Finite Element Model Updating Using Simulated Annealing and Genetic Algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. . ISSN 08883270. 12:1998) 1195–1201. doi: 10.1006/mssp.1996.0136.

Lima, Gustavo V. F.; Avila, Suzana M.; Doz, Graciela N. - Numerical Dynamic Analysis of the New Brasilia National Stadium. Em Z. DIMITROVOVÁ ET AL. (Ed.) - *11th International Conference on Vibration Problems*. Lisbon, Portugal. 2013.

Littler, J. D. - Full-scale testing of large cantilever grandstands to determine their dynamic response. Em *Stadia, arenas and grandstands : design, construction and operation*. E & FN Spon. 1998.

Littler, J. D. - The dynamic response of a three tier cantilever grandstand. Em *Structural dynamics : EURODYN '99*. Rotterdam: Balkema. 1999.

Littler, J. D. - Measured phase shifts in the dynamic response of a large permanent cantilever grandstand to human loading. Em *Structural dynamics : EURODYN2002*. München: Swets & Zeitlinger. 2002. 955-960.

Littler, J. D. - Findings from a decade of tests examining the response of grandstands to human loading. Em *Proceedings, 6th European Conference on Structural Dynamics EURODYN'2005*. Paris. 2005.

Littler, J. D.; B.R. - Establishment, Permanent cantilever grandstands : dynamic response. *Building Research Establishment*. IP 5/00 (2000).

M

Magalhães, Filipe - Identificação Modal Estocástica para Validação Experimental de Modelos Numéricos. Tese de Mestrado: FEUP. 2003

Marovic, Pavao; Galic, M.; Bertolino, Marko - Experimental testing of grandstand RC girders of the Spaladium Arena in Split. Em 2009 Montanuniversität Leoben/Austria. 2009. 145

Marques, Hugo - Acções Dinâmicas em Estádios Induzidas pelos Espectadores. Tese de Mestrado: FEUP, 2009.

Martins, Carlos A P.; Estevão, João M.C. - Caracterização Dinâmica Das Bancadas Principais Do Estádio Algarve. Sísmica 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. 2004.

MATHWORKS - MathWork (MATLAB) - Getting strated guide. Natick, Massachusetts, USA. 2016.

MICROSOFT - Microsoft Office Excel. 2013.

Mohanty, Prasenjit; Reynolds, Paul; Pavic, Aleksandar - Statistical Analysis of Online Response Data of a Stadium Structure. Imac 2005. October (2005) 1–8.

N

Naik, T.; Malhotra, V.; Popovics, J. - The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In V. Malhotra, & N. Carino, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete [Em linha] Disponível em WWW:<URL:<http://www.crcpress.com/product/isbn/9780849314858>>. ISBN 0803120990.

NP EN 12504-4 - Ensaios de Betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Portugal. 2007. 18.

NP EN 1992-1-1 - Eurocódigo 2 - Projecto estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Portugal. 2010. 259.

NP EN 1993-1-1 - Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Portugal. 2010. 116.

O

Oliveira, Luiz Eduardo S. - Computação Evolutiva. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 2005.

P

PROCEQ - Non-destructive test equipment. Concrete testing [Em linha], atual. 2016. [Consult. 1 jan. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.proceq.com/non-destructive-test-equipment/concrete-testing/ultrasonic-testing.html>>.

R

Reynolds, P.; Pavic, A. - Modal testing of a sports stadium. Em 20th International Modal Analysis Conference. January 2002.

Reynolds, P.; Pavic, A. - Changes of modal properties of a stadium structure occupied by a crowd. Proceedings of IMAC 2004. October 2015 (2004) 1–10.

Ribeiro, Diogo - Efeitos dinâmicos induzidos por tráfego em pontes ferroviárias: modelação numérica, calibração e validação experimental. Tese de Doutoramento: FEUP. 2012

Rodrigues, Jorge - Identificação Modal Estocástica Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Tese de Doutoramento: FEUP. 2004

S

Sachse, R.; Pavic, A.; Reynolds, P. - Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd-structure dynamic systems. Journal of Sound and Vibration. . ISSN 0022460X. 274:3–5 (2004) 461–480. doi: 10.1016/j.jsv.2003.08.052.

Santos, André - Análise numérica e experimental de um modelo dinâmico da Ponte Ferroviária de Antuã. Tese de Mestrado: ISEP. 2014

Saudi, Ghada; Reynolds, Paul; Zaki, Mohammed; Hodhod, Hossam - Finite-Element Model Tuning of Global Modes of a Grandstand Structure Using Ambient Vibration Testing. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*. 23:6 (2009) 467–479.

SCOSS - Thirteenth Report of SCOSS - The Standing Committee on Structural Safety, Structural Safety 2000-01. London, UK. 2001.

Setareh, Mehdi; Ph, D.; Asce, M. - Vibration Studies of a Cantilevered Structure Subjected to Human Activities Using a Remote Monitoring System. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 25:2 (2011) 87–97. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000125.

Sheskin, David J. - Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. *Technometrics*. Third Edition. C. Hall/CRC. London. 2004. Vol. 46

Silva, Carlos - Análise de vibrações em elementos pré-fabricados de bancadas de estádios. Tese de Mestrado: Universidade Nova de Lisboa. 2012.

Sporting, Portal Do - [Http://www.portalsporting.pt/](http://www.portalsporting.pt/), atual. 2015.

SVS - ARTeMIS Extractor Pro 2011, Release 5.4. 2011.

T

THERMOTRON - Vibration tests systems. 2016. [Consult. 12 abr. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://thermotron.com/equipment/vibration-test-systems.html>>.

Tuan, Y. B. - Loads due human movements on assembly structures. University of Wisconsin: Madison p. xi. 1983. 163.

U

UNHOLTZ-DICKIE CORPORATION - Vibratrimon tests equipment. 2016. [Consult. 12 abr. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.udco.com/>>.

V

Vanali, M. - Long term operational modal analysis of a stadium grandstand to structural health

monitoring purposes. , Energy, and Structural Monitoring. 2009. 103–109.

W

Wilkinson, E. R. - University of Illinois Memorial stadium: Investigation and rehabilitation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 5:1991. 2–14.

Will, J.; Gmbh, Dynardo; Möller, Dipl J.; Bauer, Dipl E.; Ag, Daimlerchrysler - Robustness evaluations of the NVH comfort using full vehicle models by means of stochastic analysis. 2004.

Y

Yang, Y. B.; Chen, Y. J. - A new direct method for updating structural models based on measured modal data. *Engineering Structures*. . ISSN 01410296. 31:1 (2009) 32–42. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.07.011.

Z

Zabel, Volkmar; Brehm, Maik - Stochastic Model Updating Methods. 27th International Modal Analysis Conference (IMAC XXVII). Orlando, USA. 2009.

Zong, Zhou-Hong; Jaishi, Bijaya; Ge, Ji-Ping; Ren, Wei-Xin. - Dynamic analysis of a half-through concrete-filled steel tubular arch bridge. *Engineering Structures*. . ISSN 01410296. 27:2005) 3–15. doi: 10.1016/j.engstruct.2004.08.007.

ANEXO I – ARTIGO PUBLICADO NO CONGRESSO ECCOMAS 2016

CALIBRATION OF THE NUMERICAL MODEL OF A STAND IN DRAGÃO STADIUM BASED ON GENETIC ALGORITHMS

Jorge Leite¹, Diogo Ribeiro*², Hugo Marques³, Rui Calçada⁴

¹ Polytechnic of Porto, School of Engineering
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 | 4249-015 Porto
1130177@isep.ipp.pt

² CONSTRUCT-LESE
Polytechnic of Porto, School of Engineering
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 | 4249-015 Porto
drr@isep.ipp.pt

³ GEG
Gabinete de Estruturas e Geotecnia
Rua Justino Teixeira, Centro de Campanhã, Bloco A, Piso 3, Esc.307 | 4300-273 Porto
hmarques@geg.pt

⁴ CONSTRUCT-LESE
University of Porto, Faculty of Engineering
Rua Dr. Roberto Frias, s/n | 4200-465 Porto
ruiabc@fe.up.pt

Keywords: stand, seating deck units, numerical modelling, dynamic test, model calibration, genetic algorithm.

Abstract. *This paper is focused on the experimental calibration of the numerical model of a stand in Dragão stadium based in genetic algorithms. A finite element numerical model of a group of seating deck units including the connections between them and the connections with the stands, was developed. Also a dynamic test was performed in the South stand in order to characterize the local dynamic properties of a group of seating deck units, particularly its natural frequencies, modal configurations and damping coefficients. The experimental calibration of the numerical model was performed using an iterative method based on a genetic algorithm. The stability of a significant number of parameters, considering different initial populations, proved the robustness of the adopted algorithm in the scope of the optimization of the numerical model. Also the calibration results demonstrate a very good agreement between numerical and experimental modal responses and a significant improvement of the numerical model before calibration.*

1 INTRODUCTION

In recent years, the organization of sport events of international scale, especially in European countries, has launched new challenges in terms of rehabilitation and reconstruction of the existing football stadiums and in some cases, the construction of new stadiums.

The need to reduce the obstacles in front of the public forced the stadiums to be built using larger span and slender structural elements. This situation took the structures to be more susceptible to resonance phenomena, especially due to the proximity between the frequencies associated with the synchronized movements of the public with the natural frequencies of vibration of the structure [1].

The new functional requirements of sports facilities, especially those associated with the safety and comfort of spectators, have led to a growing interest of researchers for the study of dynamic effects induced by the public in this type of structures [1]. These studies usually involve performing dynamic tests and the development of numerical finite element models to support decision and typically calibrated based on experimental data [1].

In this context it should be noted the experimental studies carried out by Littler et al. [2] at Twickenham Stadium (United Kingdom), by Pavic and Reynolds [3] in the stadium of Bradford (United Kingdom) and Cigada et al. [4] at Giuseppe Meazza Stadium (Italy), and involving measuring the vertical acceleration of the stands, with and without spectators, using a permanent monitoring system. The results of these studies have revealed the importance of the presence of spectators for the dynamic properties of the stands, in particular the values of vibration frequencies and damping coefficients.

Most experimental studies have mainly focused on the global analysis of the dynamic behavior of the stands, neglecting the characterization of local vibration modes associated with seating deck units. Of the few studies identified it is important to point the work of Marques et al. [5] and Marovic et al. [6], which despite focusing on the evaluation of the dynamic response values of the seating deck units during sport events, they did not include the identification of its local modal parameters.

From the works developed by Lima Avila and Doz [7], Saudi et al. [8], Marques [5] and others, experimental modal information is used for calibration of numerical finite element models of the stands. The calibrated models have proved to be especially useful in the study of reinforcement interventions [8], in the design of vibration control systems [5], identification of structural damage [7] and for simulation of load scenarios different from those normally acting with the structure in normal operation.

This article focuses on the experimental calibration of a numerical model of seating deck units of Dragão Stadium. For this purpose, it is developed a numerical finite element model that aims to study the dynamic behavior of a seating deck unit and considers the influence of its connection with neighboring seating deck units. It is also performed the experimental characterization of a series of seating deck units of the south stand of Dragão stadium, in order to identify its local dynamic properties, particularly natural frequencies, mode shapes and damping coefficients. Finally, automatic calibration of the numerical model was performed using an iterative method based on genetic algorithms, which uses a computational interface between three programs (Autodesk Robot, Excel and Matlab), allowing the inclusion of a conventional structural calculation program in an optimization flow through specific API routines.

2 DRAGÃO STADIUM

Dragão stadium is located in the city of Porto (Portugal) and was built on the occasion of the European Football Championship in 2004. The stadium has a capacity of 50092 spectators and

comprises four stands: south, west, north and east (Figure 1a). The north and south stands consist of a single level, while the east and west stands consist of two levels, one lower and one upper.

Each stand is divided into structurally independent bodies separated by joints. The structure of each body of the stand is formed by a set of frames, spaced by 8.1 m, at the interior perimeter, and 10.5 m on the perimeter of the periphery. The seating deck units are supported by the raker beams that integrate these frames.



Figure 1: Dragão stadium: a) global view; b) stands plan.

The seating deck units of the lower stands are T-shaped prefabricated elements in reinforced concrete (Figure 2). The seating deck units are formed by a horizontal plate of thickness equal to 0.10 m and width equal to 0.80 m, which supports on a vertical rib with 0.15 m thickness and variable height between 0.48 m and 0.63 m, depending on the position of the seating deck unit in the stand frames.

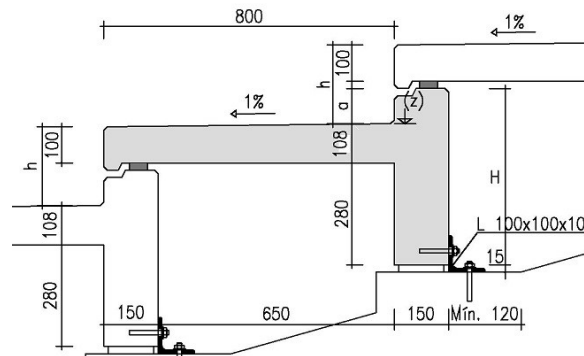


Figure 2: Seating deck units of Dragão stadium (lower stands).

In radial direction, the connection between the seating deck units is guaranteed, in an alternating solution, by rigid connections by means of 3 metal connectors type M20, and flexible connections through EPDM rubber pads. Towards its perimeter each seating deck unit is separated from neighbors by joints.

Each seating deck unit is supported in raker beams by means of a clamping device consisting of a steel angle L100×100×10 which is connected to the vertical seating deck unit rib and to the beam frame by means of two steel connectors type M12. Between the base of the rib of the seating deck unit and the stand beam there is a neoprene pad with 15 mm thick.

3 NUMERICAL MODEL

3.1 Description

The numerical finite element model of the seating deck units of the stands of Dragão stadium was developed using the commercial software Autodesk Robot Structural Analysis [9] (Figure 3a).

The numerical model comprises a set of 10 consecutive seating deck units, located on the south stand inside the area identified in Figure 1b, and aims the characterization of the local dynamic behavior of seat deck unit of row 14 considering the influence of its connection with neighboring seating deck units.

The horizontal plates and ribs of seating deck units in addition to the steel angle of the supports, were modeled by shell finite elements, while the remaining elements, in particular the steel connectors and the elastic supports between seating deck units and between the seating deck units and the stand frame, were modeled using beam finite elements. In Figure 3b is illustrated in detail the modeling of the links between seating deck units and between the seating deck units and the stand frame.

In the numerical model all the structural elements that constitute the seating deck units, were reproduced, in accordance with the design information. For simplicity all seating deck units were modeled with a span equal to 8.22 m corresponding to the span of the seating deck unit of row 14.

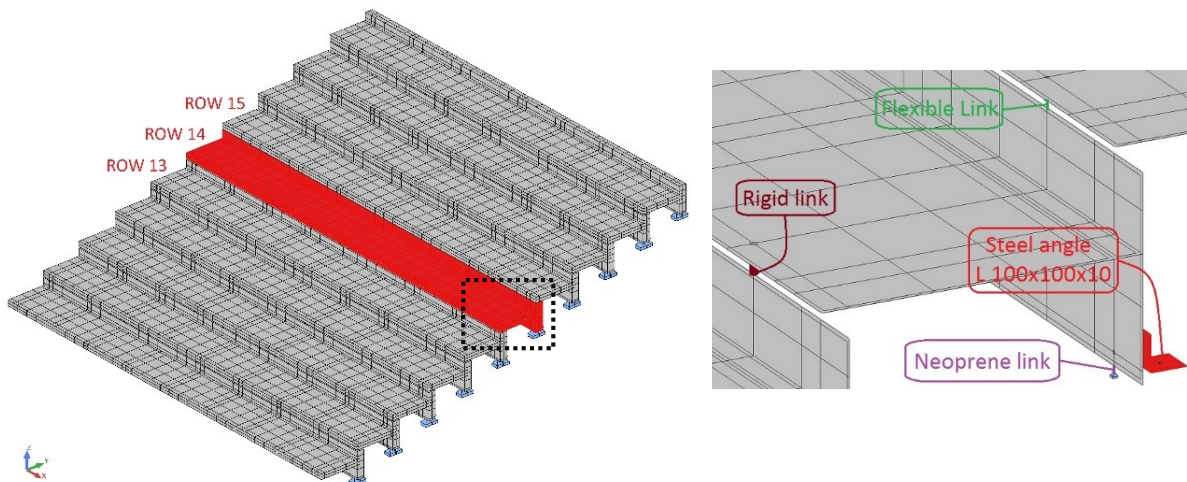


Figure 3: FE numerical model: a) global view, b) detail of modeling of the links between seating deck units and between the seating deck units and the stand

3.2 Geometrical and mechanical properties

Table 1 presents the most relevant geometric and mechanical parameters adopted in the numerical model of seating deck units, including its name, the value adopted and respective units. In addition, the upper and lower limits that will be used later in the calibration phase of the numerical model are also indicated.

3.3 Numerical modal parameters

Figure 4 shows the values of the vibration frequencies of the main local modes of the seating deck units and the corresponding mode shapes obtained from the numerical model developed based on the adopted values of parameters listed in Table 1. Modes 1 and 5 essentially involve bending movements of the seating deck units. Modes 2, 3 and 4 mainly involve torsional movements of the seating deck units. In the mode shapes were only represented the seating deck units of rows 13, 14 and 15.

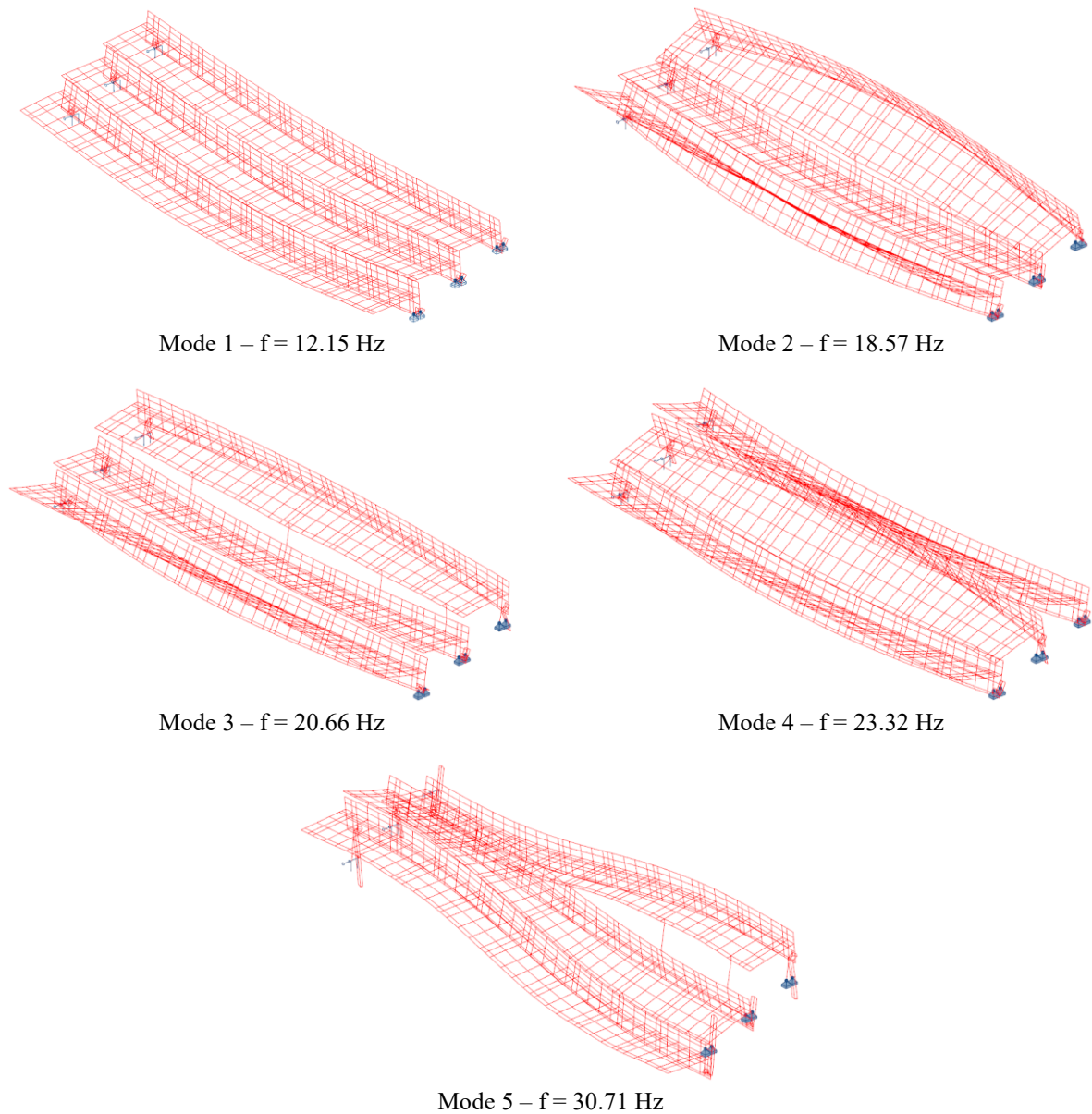


Figure 4: Numerical modal parameters.

4 DYNAMIC TEST

4.1 Description

The dynamic test aimed to identify the modal properties of the seating deck units, especially its natural frequencies and local vibration modes and the respective damping coefficients.

The test was conducted using a technique with fixed reference points and mobile measurement points, involving the use of 16 high sensitivity piezoelectric accelerometers, PCB 393B12 model. The accelerations were measured in the vertical (z) and radial (y) directions in a total of 49 measurement points located in the seating deck units of rows 8, 13, 14, 15, 18 and 28 of south stand.

Figure 5a illustrates the position of the accelerometers in the seating deck units. The ends of the seating deck units of rows 8, 14, 18 and 28 were instrumented in the vertical direction, in order to identify eventually global movements associated with the stand frames. In turn, the seating deck units of rows 13, 14 and 15 were instrumented in the vertical and radial directions in order to characterize the local movements of the seating deck units.

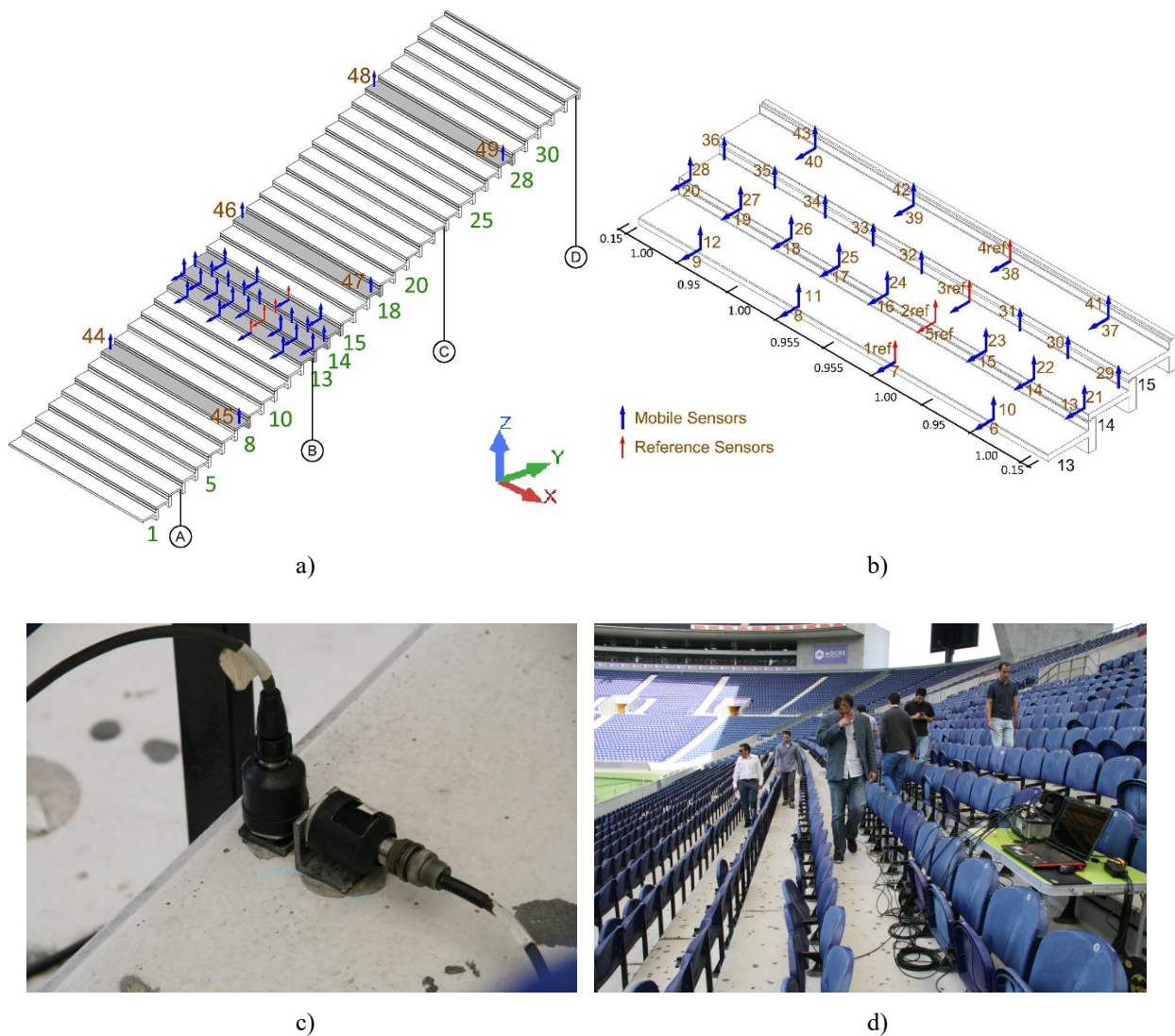


Figure 5: Dynamic test: a) measurement points (global view); b) measurement points of rows 13, 14 and 15; c) accelerometers; d) external excitation.

The reference transducers were located on the seating deck units of rows 13, 14 and 15 in positions 1, 2, 3, 4 and 5 (Figure 5b). Data acquisition was performed using NI cDAQ-9172 system, using four NI 9234 modules for IEPE type accelerometers. The time series were acquired with a duration of 5 minutes, with a sampling frequency of 2048 Hz, further decimated

at a frequency equal to 256 Hz. The connection of accelerometers to seating deck units was performed by means of metallic plates and angles bonded to the concrete surface (Figure 5c).

The test took place under an external excitation ensured by the action of a group of individuals who performed jumps and walked randomly over time (Figure 5d).

4.2 Modal parameters identification

The identification of modal parameters was performed by the application of the Enhanced version of Frequency Domain Decomposition method (EFDD) using the commercial software ARTeMIS [10].

Figure 6 show the curves of the average and normalized singular values of spectral density matrices of all experimental setups, obtained by the EFDD method. Five local vibration modes associated with the seating deck units in correspondence with the 5 peaks indicated in the curve of the first singular value, were identified.

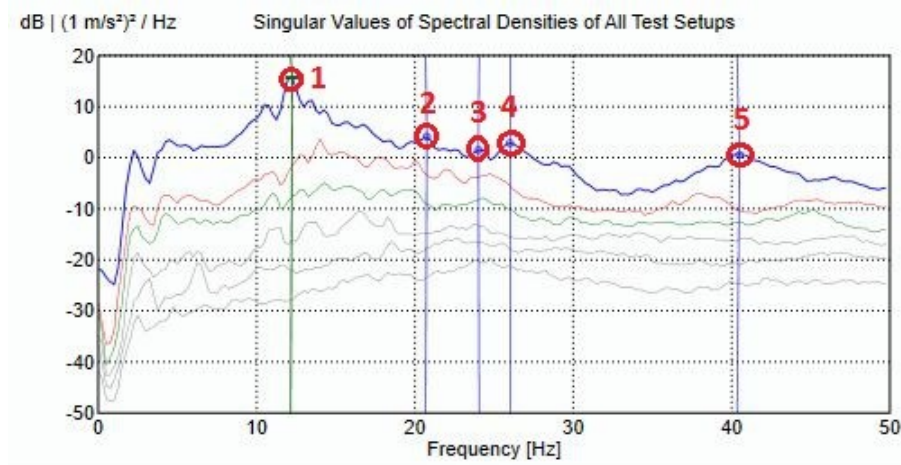


Figure 6: EFDD method: average and normalized singular values of spectral density matrices.

In Figure 7 are shown the mean values of natural frequencies and corresponding local modes of vibration of the seating deck units. The analysis of the modal configurations allows to identify movements associated with bending and twisting of the seating deck units with very good definition. In these modes of vibration the movements of the stand frames are negligible. Modes 2 and 3 are distinguished by the fact that the movement of the seating deck unit of row 14 involves transverse and vertical bending, respectively. The values of the damping coefficients vary between 1.11% and 2.53%.

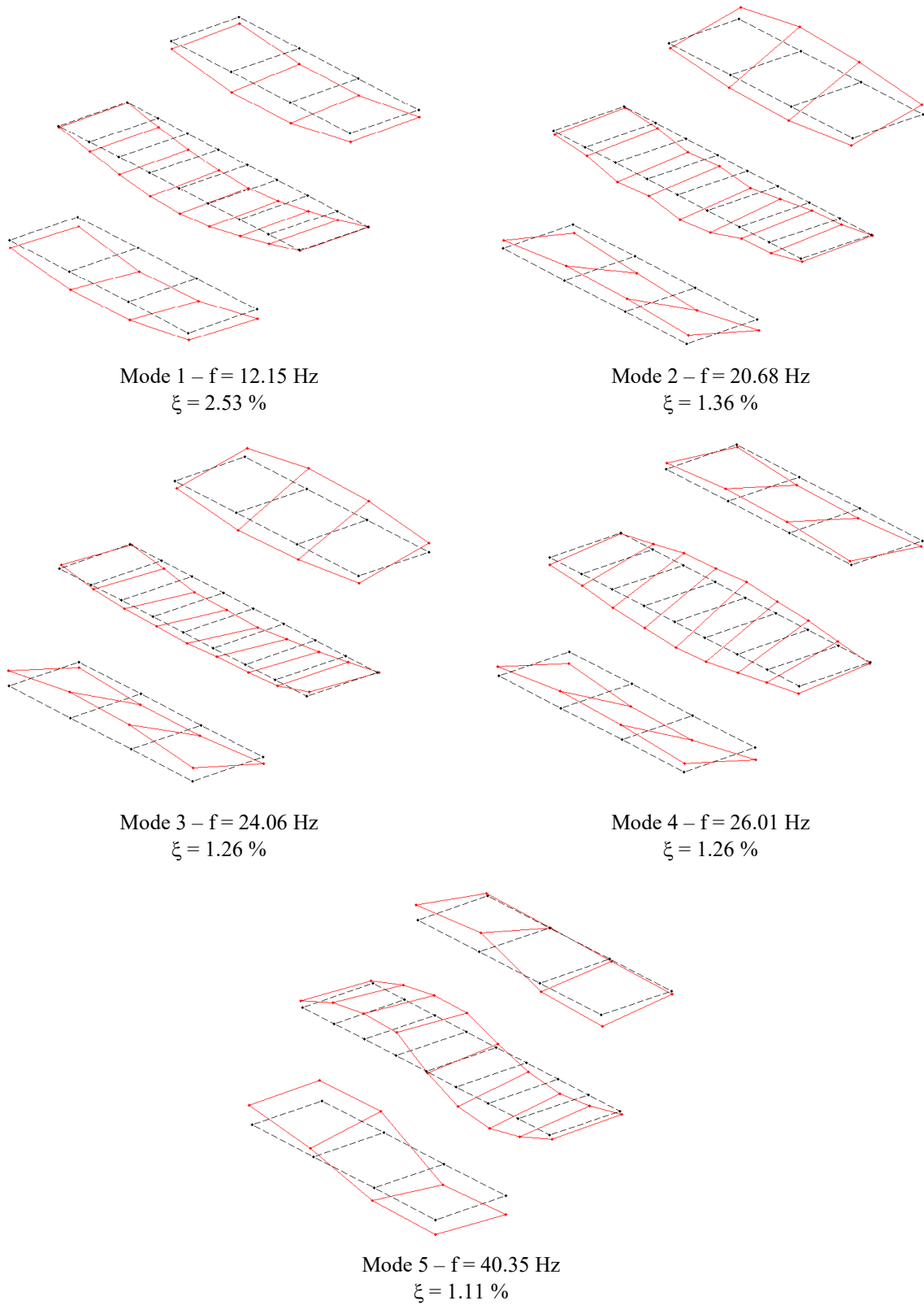


Figure 7: Experimental modal parameters.

5 CALIBRATION

The calibration of the numerical model of the seating deck units was based on the results of the dynamic test and involved performing a sensitivity analysis and an optimization based on genetic algorithms.

5.1 Methodology

Figure 8 presents a flowchart illustrating the iterative process of the numerical model calibration based on a genetic algorithm and involving the use of three softwares: Autodesk Robot [9], Excel [11] and Matlab [12]. A detailed explanation of the proposed methodology is presented in reference [13].

In the present work some improvements to the tool developed by Ribeiro et al. [13] which allowed to improve its versatility and computational efficiency, were introduced, in particular: i) the possibility of performing the numerical modeling of the structure in a conventional automatic structural calculation software, in this case Autodesk Robot; ii) the implementation of API routines from Robot software, in Excel environment, that enable an efficient interconnection of the numerical model to the optimization algorithm, namely for the extraction of numerical modal parameters, from Robot to Matlab, and for the introduction of new set of values of numerical parameters, from Matlab to Robot, and iii) the application of genetic algorithms based on existing routines of Matlab software.

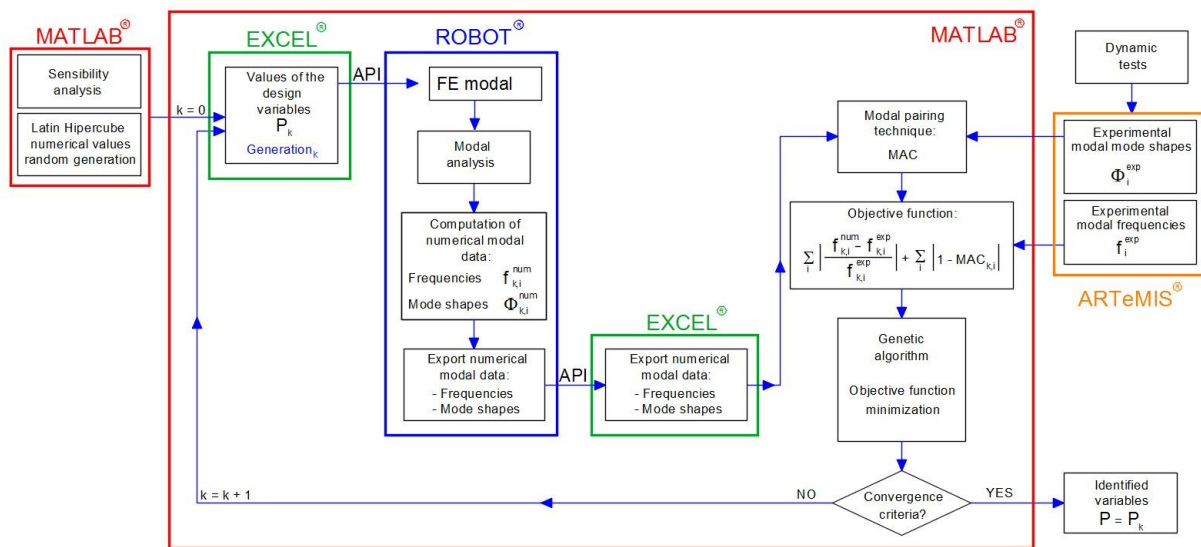


Figure 8: Flowchart of the calibration methodology of the numerical model.

5.2 Sensitivity analysis

The sensitivity analysis aims identifying the parameters that most influence the responses of seating deck units, particularly the natural frequencies and vibration modes, and which will be later included in the optimization phase.

Figure 9 shows the results of the sensitivity analysis using a Spearman correlation coefficients matrix [14]. The sensitivity analysis was performed using a stochastic sampling technique based on 1000 samples generated by Latin Hypercube method. The correlation coefficients situated in the range $[-0.20; +0.20]$ were excluded from the graphical representation.

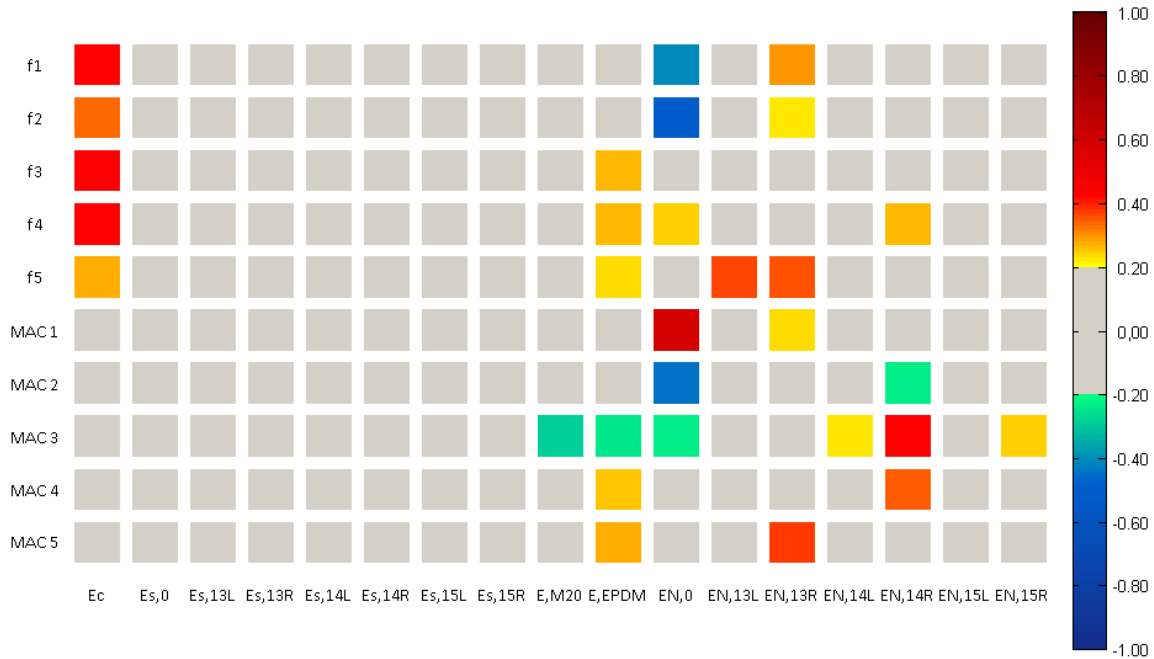


Figure 9: Spearman correlation matrix.

The correlation matrix shows that the elasticity modulus of concrete (E_c), elasticity modulus of steel in M20 connectors between seating deck units (E_{M20}), elasticity modulus of EPDM rubber pads between seating deck units (E_{EPDM}) and elasticity modulus of neoprene (E_N) of almost all the seating rows, are the parameters that most influence the modal responses.

5.3 Optimization

The optimization phase aimed to obtain the values of the numerical parameters that minimize the differences between the numerical and experimental modal parameters, and involves the definition of an objective function and the application of an optimization technique based on a genetic algorithm.

The objective function (f) comprises two terms, one related with the residuals of the vibration frequencies and other related with the residuals of MAC values:

$$f = a \sum_{i=1}^5 \frac{|f_i^{exp} - f_i^{num}|}{f_i^{exp}} + b \sum_{i=1}^5 |MAC(\phi_i^{exp}, \phi_i^{num}) - 1| \quad (1)$$

where f_i^{exp} and f_i^{num} are the experimental and numerical frequencies for mode i , ϕ_i^{exp} and ϕ_i^{num} are the vectors containing the experimental and numerical modal information regarding mode i , and a and b are weighting factors of the terms of the objective function assumed, in this situation, equal to 1.0.

The optimization model involves 9 numerical parameters and 10 modal results. The genetic algorithm was based on an initial population of 30 individuals and 100 generations, in a total of 3000 individuals. The initial population was randomly generated by Latin Hypercube method. In this algorithm was defined a number of elites equal to 1, a replacement rate equal to 5% and a crossing rate of 50%.

In Figure 10 are presented the ratios of the values of each numerical parameter in relation to the limits given in Table 1 for the independent optimization runs GA1 to GA4. A ratio of 0% means that parameter coincides with the lower limit and a ratio of 100% means that coincides with the upper limit. The global parameters and parameters related to the interfaces between

the seating deck units are shown in Figure 10a, with the correspondent values indicated in brackets. The parameters of the interfaces of the seating deck units to stand beams are shown in Figure 10b.

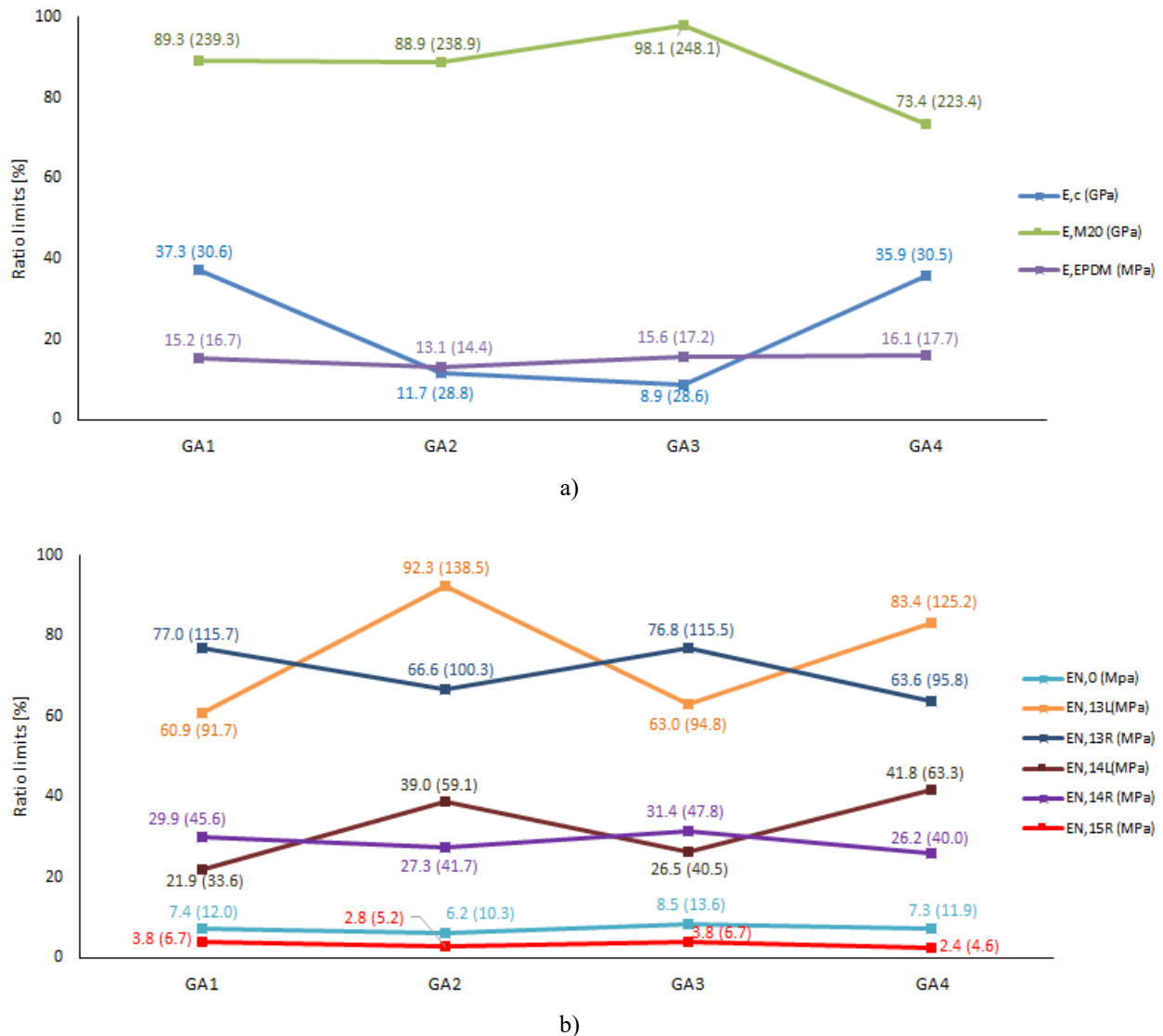


Figure 10: Values of numerical parameters obtained for optimization runs GA1 to GA4: a) global parameters and parameters of the interfaces between the seating deck units; b) parameters of the interfaces between seating deck units and stand beams.

The results help identifying as that the most sensitive parameter, the elasticity modulus of neoprene layer between seating deck units and stand beams of the other rows (E_N), which is the one exhibiting the lower variations, close to 3%. The elasticity modulus of EPDM rubber pads between seating deck units (E_{EPDM}) also has lower variations, in the order of 3%, possibly due to the fact that it has correlation with several modal responses. For the elasticity modulus of concrete (E_c) and the elasticity modulus of steel in M20 connectors between seating deck units (E_{M20}), which are less sensitive to the responses, estimates have higher variations and near 25%.

Regarding elasticity modulus of neoprene layer between seating deck unit and stand beams of row 13, at left (E_{N13L}) and right sides (E_{N13R}), the estimates show variations with opposite trend, that is, the increased stiffness of the left support is normally associated with a decreased

stiffness of the right support and vice-versa. The same applies to the elasticity modulus of neoprene layer between seating deck unit and stand beams of row 14, at left (E_{N14L}) and right sides (E_{N14R}). This should be related to the fact that there are different combinations of these sets of parameters that lead to the same solution in terms of the optimization problem.

Figure 11a presents the experimental and numerical values of vibration frequencies before and after calibration, indicating the values of errors of numerical and experimental vibration frequencies, with reference to the values of the experimental frequencies. The numerical results after calibration refer to the optimization run GA3, which was the case that led to the lowest residue of the objective function. Figure 11b shows the MAC values before and after calibration.

The average error of the frequencies decreased from 11.8% before calibration to 2.4% after calibration. The average value of the MAC parameter increased from 0.795 before calibration to 0.911 after calibration.

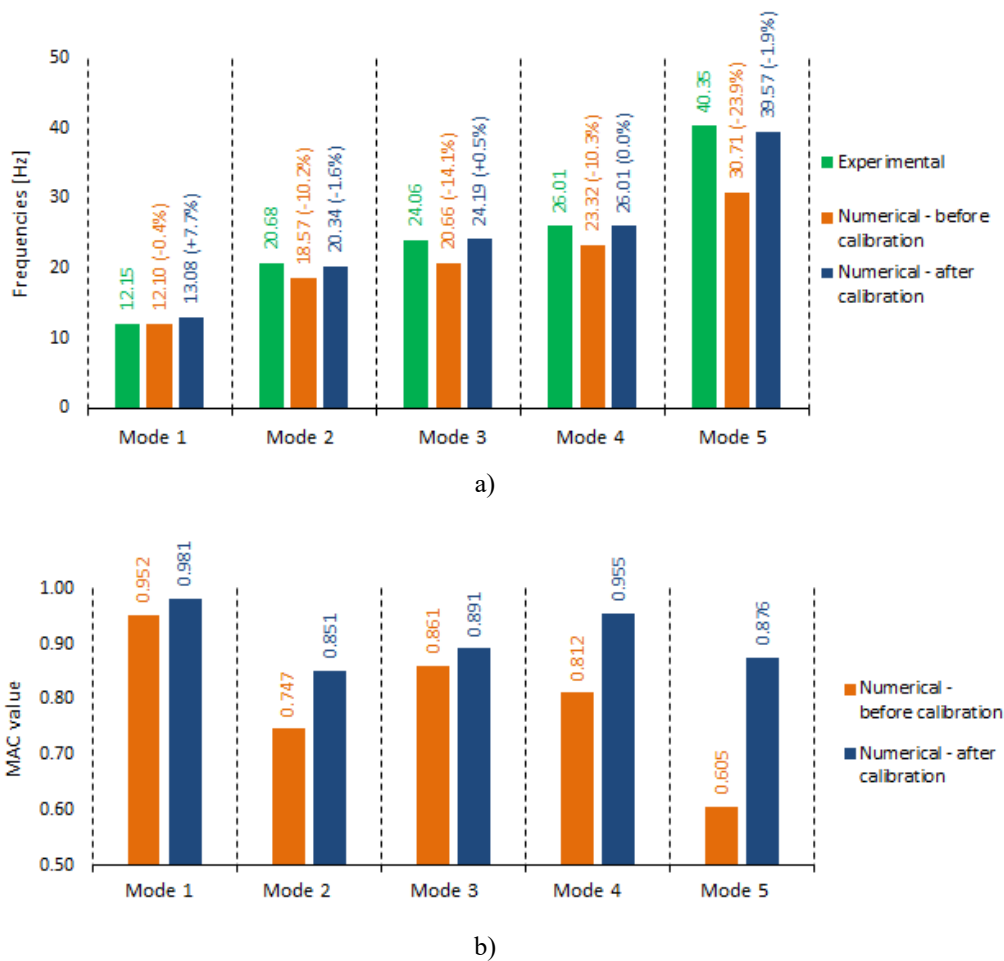


Figure 11: Correlation analysis of experimental and numerical modal parameters: a) frequencies of vibration; b) MAC values.

6 CONCLUSIONS

This article focused on the experimental calibration of a numerical model of seating deck units of Dragão stadium.

The three dimensional finite element numerical model includes a series of 10 consecutive seating deck units. In the modeling special attention was given to the link between the seating deck units as well as the connection of the seating deck units to the stand beams.

The dynamic test carried out on a series of seating deck units of the south stand of the stadium allowed the identification of five local vibration modes, mainly involving coupled bending and torsion movements of the seating deck units, with frequencies ranged between 12.15 Hz and 40.36 Hz.

The results of the optimization of the numerical model of the seating deck units demonstrated a very good approximation with experimental results and a significant improvement in relation to the numerical model before calibration. On the other hand, the genetic algorithm allowed to obtain sufficiently stable estimates of a significant number of parameters, considering different initial populations, proving its efficiency and robustness.

The analysis of the values of numerical parameters after calibration allowed to established that: i) the optimal value of the elasticity modulus of steel in M20 connectors between seating deck units approached the upper limit, reflecting, possibly, a more effective link between the seating deck units in relation to the planned design; ii) the values of elasticity modulus of neoprene layer between seating deck units and stand beams have very different values depending on the seat deck unit and position on the seat deck unit, which corroborates the evidences of a visual inspection carried out *in situ*, which in some situations found the absence of supports, and in other situations the existence of supports performed with materials and thicknesses different from those specified in design; iii) the optimal value of the elasticity modulus of concrete approached its lower bound, standing in the range between 28.6 GPa and 30.6 GPa.

As future developments the authors intend to carry out the validation of the numerical model of seating deck units under the action of controlled movements of public based on dynamic analysis that include public-structure interaction and taking into account eventual nonlinearities of the dynamic system. For this purpose, it is planned to carry out a dynamic test under public action with the measurement of the forces applied by individuals and the responses in terms of accelerations of seating deck units.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge Porto Estádio for all the information provided about Dragão stadium and for all the support and facilities given during the experimental campaign.

REFERENCES

- [1] SCOSS, Thirteenth Report of SCOSS - The Standing Committee on Structural Safety, Strutural Safety 2000-01, London, UK, 2001.
- [2] T. Ji, J. Littler, B. Ellis, The response of grandstands to dynamic crowd loads, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, **140**, 355–365, 2000.
- [3] P. Reynolds and A. Pavic, Modal testing of a sports stadium, in *20th International Modal Analysis Conference*, February, 2002.
- [4] A. Cigada, A. Caprioli, M. Redaelli, Numerical Modeling and Experimental Modal Analysis of a Concrete Grand-stand Structure to Structural Health Monitoring Purposes, in *Proceedings of the international conference (IMAC XXVI)*, Orlando, 2007.
- [5] H. Marques, A. Arêde, R. Delgado, Vibration monitoring of a grandstand in Dragon Stadium, in *EVACES - Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 2007.

- [6] P. Marovic, M. Galic, M. Bertolino, Experimental testing of grandstand RC girders of the Spaladium Arena in Split, in *2009 Montanuniversität Leoben/Austria*, September 23-26, 2009.
- [7] G. Lima, S. Avila, G. Doz, Numerical Dynamic Analysis of the New Brasilia National Stadium, in *11th International Conference on Vibration Problems*, September, 2013.
- [8] G. Saudi, P. Reynolds, M. Zaki, H. Hodhod, Finite-Element Model Tuning of Global Modes of a Grandstand Structure Using Ambient Vibration Testing, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **23**, 467–479, 2003.
- [9] Autodesk, *Autodesk Robot Structural Analysis 2015 - Getting Started Guide*, San Francisco, USA, 2014.
- [10] SVS, *ARTEMIS Extractor Pro 2011 - Academic licence, Release 5.4*, Aalborg, Denmark, 2011.
- [11] Microsoft, *Microsoft Office Excel 2013 user guide*, Redmond, USA, 2013.
- [12] MathWorks, *MathWork (MATLAB) - Getting started guide*. MathWorks, Natick, Massachusetts, USA, 2016.
- [13] D. Ribeiro, R. Calçada, R. Delgado, M. Brehm, V. Zabel, Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters, *Engineering Structures*, **40**, 413–435, 2012.
- [14] M. Brehm, V. Zabel, C. Bucher, An automatic mode pairing strategy using an enhanced modal assurance criterion based on modal strain energies, *Journal of Sound and Vibration*, **329**, 5375–5392, 2010.

ANEXO II – ARTIGO SUBMETIDO E ACEITE NO CONGRESSO TEST&E 2016

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS DOS DEGRAUS DE BANCADA DO ESTÁDIO DO DRAGÃO

Jorge Leite¹, Diogo Ribeiro², Hugo Marques³ e Rui Calçada⁴

¹Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

²CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

³GEG - Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Porto, Portugal

⁴CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

1130177@isep.ipp.pt

dr@isep.ipp.pt

hmarques@geg.pt

ruiabc@fe.up.pt

RESUMO

Este artigo centra-se na avaliação experimental das propriedades dinâmicas dos degraus de bancada do Estádio do Dragão. Foram realizados ensaios de caracterização dinâmica a um conjunto de degraus das bancadas norte e sul, tendo em vista a identificação das suas propriedades dinâmicas locais, nomeadamente as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento. A identificação dos parâmetros modais foi realizada por aplicação da versão melhorada do método da decomposição no domínio da frequência (EFDD). No caso dos coeficientes de amortecimento os seus valores foram também estimados por aplicação do método do decremento logarítmico aos registos de acelerações filtrados. Os resultados dos ensaios permitiram constatar a influência da ligação entre os degraus nas propriedades dinâmicas locais dos degraus de bancada, além da identificação de não linearidades associadas a alguns dos componentes do sistema.

Palavras-chave: degraus de bancada, Estádio do Dragão, ensaios dinâmicos, parâmetros modais

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a organização de eventos desportivos de escala internacional, sobretudo em países europeus, tem lançado novos desafios ao nível da reabilitação e reconstrução dos estádios de futebol existentes e, em alguns casos, na construção de novos estádios.

A necessidade de reduzir os obstáculos à frente do público obrigou a que os estádios fossem construídos com recurso a elementos de maior vão e mais esbeltos. Esta situação tornou as estruturas mais suscetíveis a fenómenos de ressonância, sobretudo devido à aproximação das frequências associadas aos movimentos sincronizados do público às frequências de vibração próprias da estrutura [1].

As novas exigências funcionais dos recintos desportivos, sobretudo as associadas à segurança e conforto dos espetadores, têm levado a um crescente interesse dos investigadores pelo estudo dos efeitos dinâmicos induzidos pelo público neste tipo de estruturas. Estes estudos envolvem geralmente a realização de ensaios dinâmicos e o desenvolvimento de modelos numéricos de elementos finitos de apoio à decisão e calibrados com base em informação experimental [1].

Neste âmbito importa referir os estudos experimentais levados a cabo por Littler et al. [2] no estádio de Twickenham (Reino Unido), por Pavic e Reynolds [3] no estádio do Bradford (Reino Unido) e por Cigada et al. [4] no estádio Giuseppe Meazza (Itália), e que envolveram a medição das acelerações verticais da estrutura das bancadas, com e sem espetadores, com recurso a sistemas permanentes de monitorização. Os resultados destes estudos revelaram a importância da presença dos espetadores nas propriedades dinâmicas das bancadas, em particular nos valores das frequências de vibração e dos coeficientes de amortecimento.

A maioria dos estudos experimentais têm incidido, sobretudo, na análise global do comportamento dinâmico das bancadas, negligenciando a caracterização dos modos de vibração locais associados aos degraus de bancada. Dos poucos estudos identificados importa apontar os trabalhos de Marques et al. [5] e Marovic et al. [6] que, apesar de incidirem na avaliação dos valores da resposta dinâmica dos degraus de bancada durante eventos desportivos, não contemplaram a identificação dos seus parâmetros modais locais.

Nos trabalhos desenvolvidos por Lima Avila e Doz [7], Saudi et al. [8], Marques [5] e outros, a informação modal experimental é utilizada na calibração de modelos numéricos de elementos finitos das bancadas. Os modelos calibrados revelaram ser especialmente úteis no estudo de intervenções de reforço [8], na conceção de sistemas de controlo de vibrações [5], na identificação de danos estruturais [7] e na simulação de cenários de carga diferentes dos que habitualmente a estrutura está sujeita em operação.

Este artigo centra-se na avaliação experimental das propriedades dinâmicas dos degraus de bancada do Estádio do Dragão. Para o efeito foram realizados ensaios dinâmicos a um conjunto de degraus das bancadas norte e sul, tendo em vista a identificação das suas propriedades dinâmicas locais, nomeadamente as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento. Os resultados dos ensaios permitiram constatar a influência da ligação entre os degraus nas propriedades modais, além da identificação de não linearidades associadas a alguns dos componentes do sistema.

2. O ESTÁDIO DO DRAGÃO

O estádio do Dragão foi construído por ocasião do Campeonato da Europa de Futebol de 2004. O estádio tem a capacidade de 50092 espetadores e compreende 4 bancadas: sul, ponte, norte e nascente (Figura 1a). As bancadas norte e sul são constituídas por um único nível, enquanto as bancadas nascente e ponte são constituídas por dois níveis, um inferior e outro superior.

Cada bancada encontra-se dividida em corpos estruturalmente independentes, separados por juntas. A estrutura de cada corpo da bancada é formada por um conjunto de pórticos, afastados entre si de 8,1 m, no perímetro de intradorso, e 10,5 m no perímetro da periferia. Sobre estes pórticos assentam diretamente os degraus de bancada.



Figura 1: Estádio do Dragão: a) vista geral; b) planta das bancadas.

Os degraus das bancadas inferiores são elementos pré-fabricados em betão armado em forma de T (Figura 2). Os degraus são formados por um patamar, de espessura igual a 0,10 m e vão igual a 0,80 m, que apoia numa nervura vertical com 0,15 m de espessura e altura variável entre 0,48 m a 0,63 m, consoante a posição do degrau nos pórticos da bancada.

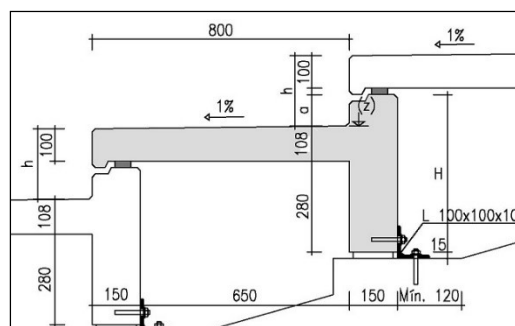


Figura 2: Corte transversal dos degraus das bancadas inferiores do Estádio do Dragão.

Na direção radial, a ligação entre os degraus de bancada é garantida, de um modo alternado, por intermédio de ligações rígidas, através de 3 conectores metálicos do tipo M20, e por ligações flexíveis realizadas por intermédio de apoios em borracha EPDM. Na direção perimetral cada degrau de bancada encontra-se separado dos vizinhos por meio de juntas. Cada degrau encontra-se apoiado nos pórticos de bancada por meio de um dispositivo de fixação constituído por uma cantoneira metálica L100×100×10 que está ligada à nervura vertical do degrau e à viga do pórtico da bancada por meio de dois conectores metálicos do tipo M12. Entre a base da nervura do degrau e a viga da bancada existe ainda uma lâmina em neoprene com 15 mm de espessura.

3. ENSAIOS DINÂMICOS DOS DEGRAUS DE BANCADA

Os ensaios dinâmicos decorreram em duas fases, denominadas de fases 1 e 2, e tiveram como objetivo a identificação das propriedades modais locais dos degraus de bancada, sobretudo as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento.

A fase 1 incidiu na identificação modal de um conjunto de degraus de bancada localizados na bancada sul e permitiu avaliar a influência da ligação entre os degraus nas suas propriedades dinâmicas locais. Por sua vez, a fase 2 envolveu a identificação modal de 10 degraus individuais localizados nas bancadas norte e sul com idênticas condições geométricas e de apoio e permitiu avaliar a variabilidade dos valores das frequências e dos coeficientes de amortecimento de alguns dos modos de vibração locais dos degraus.

3.1. Fase 1

A fase 1 dos ensaios foi realizada com recurso a uma técnica com pontos de referência fixos e pontos de medição móveis, envolvendo a utilização de 16 acelerómetros piezoelétricos de elevada sensibilidade, modelo PCB 393B12. As acelerações foram medidas na direção vertical (z) e radial (y), tendo sido instrumentados um total de 49 pontos de medição localizados nos degraus das filas 8, 13, 14, 15, 18 e 28 da bancada sul, no alinhamento identificado na Figura 1b.

Na Figura 3a ilustra-se a posição dos acelerómetros nos degraus de bancada. As extremidades dos degraus das filas 8, 14, 18 e 28 foram instrumentadas, na direção vertical, com o objetivo de identificar eventuais movimentos de carácter global associados aos pórticos da bancada. Por sua vez, os degraus das filas 13, 14 e 15 foram instrumentados nas direções vertical e radial, de modo a caracterizar os movimentos de carácter local associados aos degraus de bancada.

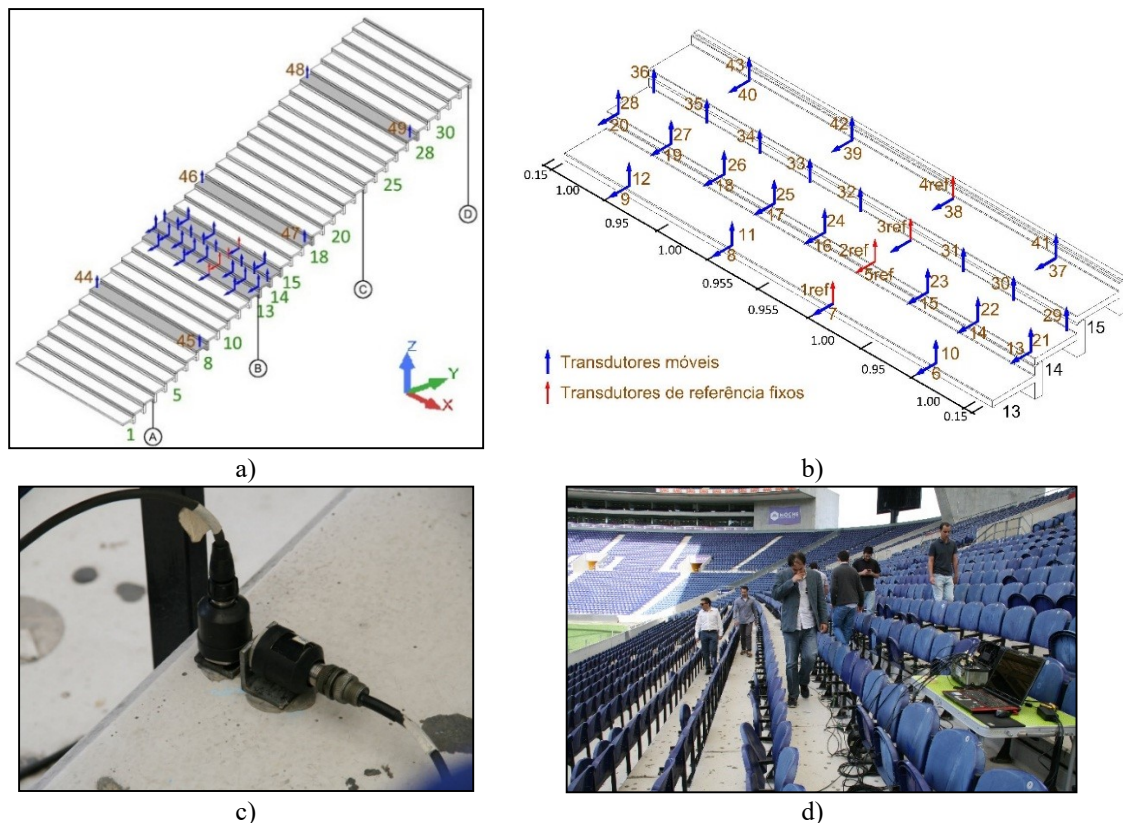


Figura 3: Ensaio dinâmico - fase 1: a) localização dos pontos de medição; b) pontos de medição nas filas 13, 14 e 15; c) acelerómetros piezoelétricos; d) excitação externa.

Os transdutores de referência foram localizados nos degraus das filas 13, 14 e 15, nas posições 1, 2, 3, 4 e 5 (Figura 3b). A aquisição de dados foi realizada através do sistema NI cDAQ-9172 da National Instruments, com recurso a quatro módulos NI 9234 para acelerómetros do tipo IEPE. As séries temporais foram adquiridas com uma duração aproximada de 5 minutos, e com uma frequência de amostragem de 2048 Hz, posteriormente decimadas para uma frequência igual a 256 Hz. A ligação dos acelerómetros aos degraus de bancada foi efetuada por intermédio de chapas e cantoneiras metálicas coladas à superfície de betão (Figura 3c). O ensaio decorreu sob a excitação externa assegurada por intermédio da ação de um grupo de indivíduos que executaram saltos e caminharam de forma aleatória em termos temporais (Figura 3d).

3.2. Fase 2

A fase 2 dos ensaios dinâmicos envolveu a medição das respostas dinâmicas em três pontos pertencentes a 10 degraus individuais de bancada, 5 localizados na bancada norte (Figura 4a) e 5 localizados na bancada sul (Figura 4b).

O posicionamento dos acelerómetros foi definido conforme os detalhes da Figura 4c) e envolveu a colocação de um acelerómetro a meio vão do degrau e dois acelerómetros a aproximadamente 1/4 vão do degrau, um de cada lado do patamar. Este posicionamento procurou evitar os previsíveis pontos de ordenada nula dos dois primeiros modos de vibração envolvendo a flexão vertical do degrau, além de permitir identificar eventuais movimentos de torção do degrau. As características do sistema de aquisição de dados e dos acelerómetros, a duração das séries temporais e a ligação dos acelerómetros aos degraus de bancada foram realizados de forma idêntica à fase 1 do ensaio dinâmico.

A excitação externa foi assegurada pela ação de pessoas sobre os degraus, em virtude de os níveis de aceleração dos degraus de bancada em condições ambientais serem muito reduzidos. A técnica de excitação envolveu numa primeira fase a execução de saltos e caminhada de forma aleatória no degrau instrumentado da fila 14 e também nos degraus vizinhos das filas 13 e 15, e numa segunda fase a execução de saltos pontuais, intervalados de 10 s, e aplicados de forma sucessiva a meio vão do degrau da fila 14 por ação de um único indivíduo (Figura 4d).

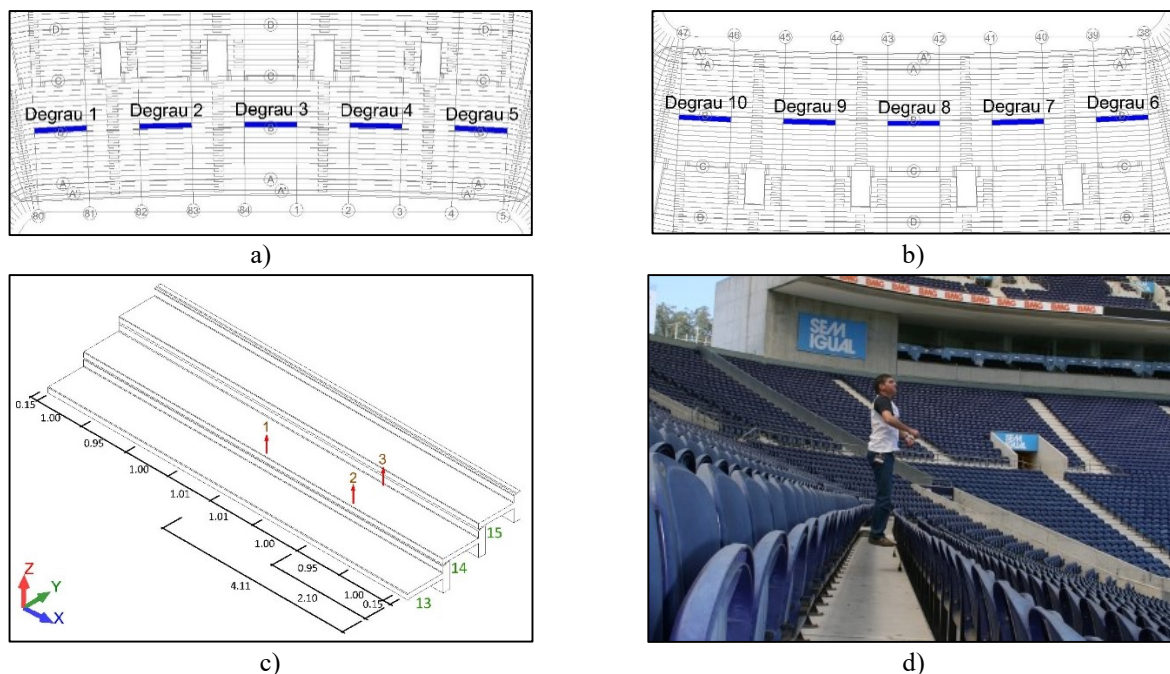


Figura 4: Ensaio dinâmico - fase 2: a) identificação dos degraus instrumentados da bancada norte; b) identificação dos degraus instrumentados da bancada sul; c) pontos de medição na fila 14; d) excitação externa por ação de um indivíduo.

4. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS

A identificação dos parâmetros modais foi realizada por aplicação da versão melhorada do método da decomposição no domínio da frequência (EFDD), com recurso ao programa comercial ARTeMIS [9].

4.1 Fase 1

Na Figura 5 apresentam-se as curvas dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros de todas as configurações experimentais realizadas na fase 1 dos ensaios dinâmicos, obtidas por aplicação do método EFDD. Foram

identificados 5 modos de vibração locais associados aos degraus de bancada em correspondência com os 5 picos assinalados na curva do primeiro valor singular.

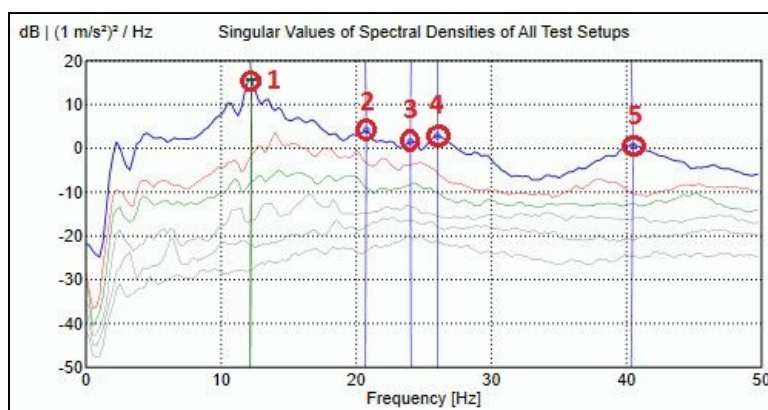


Figura 5: Método EFDD – fase 1: valores singulares médios e normalizados da matriz dos espetros.

Na Figura 6 são ilustrados os valores médios das frequências e as correspondentes configurações dos modos de vibração locais dos degraus de bancada identificados na fase 1 dos ensaios. A análise das configurações permite identificar movimentos associados à flexão e torção dos degraus de bancada com muito boa definição. Os modos 1 e 5 envolvem essencialmente a flexão dos degraus. Os modos 2, 3 e 4 envolvem sobretudo movimentos de torção dos degraus. As configurações dos modos 2 e 3 distinguem-se pelo facto dos movimentos do degrau 14 serem de flexão nas direções transversal e vertical, respetivamente. Em todos estes modos de vibração os movimentos dos pórticos da bancada são negligenciáveis. Nas configurações modais apenas foram representados os degraus das filas 13, 14 e 15. Os valores médios dos coeficientes de amortecimento variam entre 1,11 % e 2,53 %.

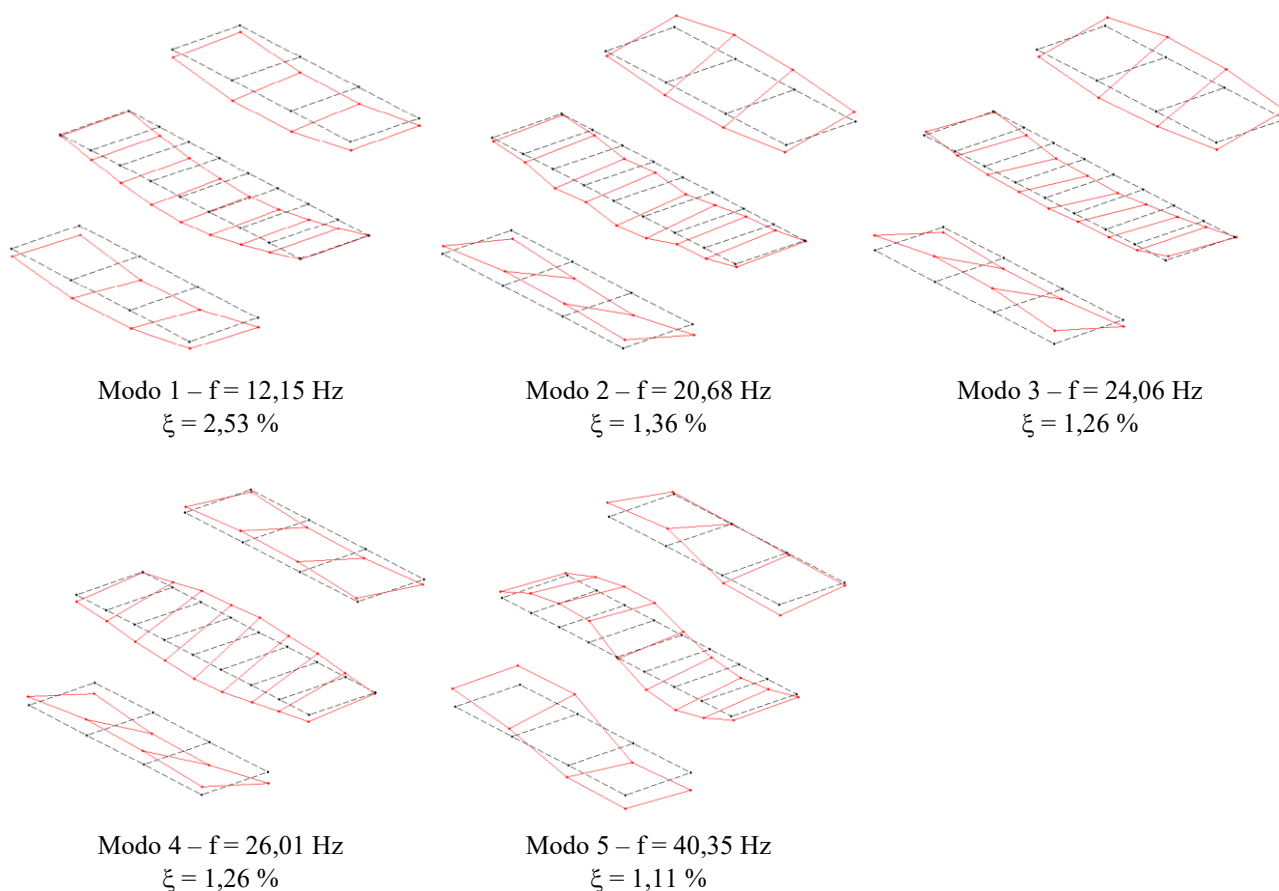


Figura 6: Parâmetros modais experimentais - fase 1

4.2 Fase 2

Na Figura 7 apresentam-se as curvas dos valores singulares das funções densidade espectral de potência para cada um dos degraus ensaiados (1 a 10) na fase 2 do ensaio. Em cada gráfico é identificada a posição dos picos correspondentes aos 1º e 2º modos de flexão vertical do degrau 14, ou seja, os modos 1 e 5 respetivamente, incluindo a indicação dos valores das respetivas frequências de vibração. O degrau 8 corresponde ao degrau ensaiado na fase 1 do ensaio dinâmico.

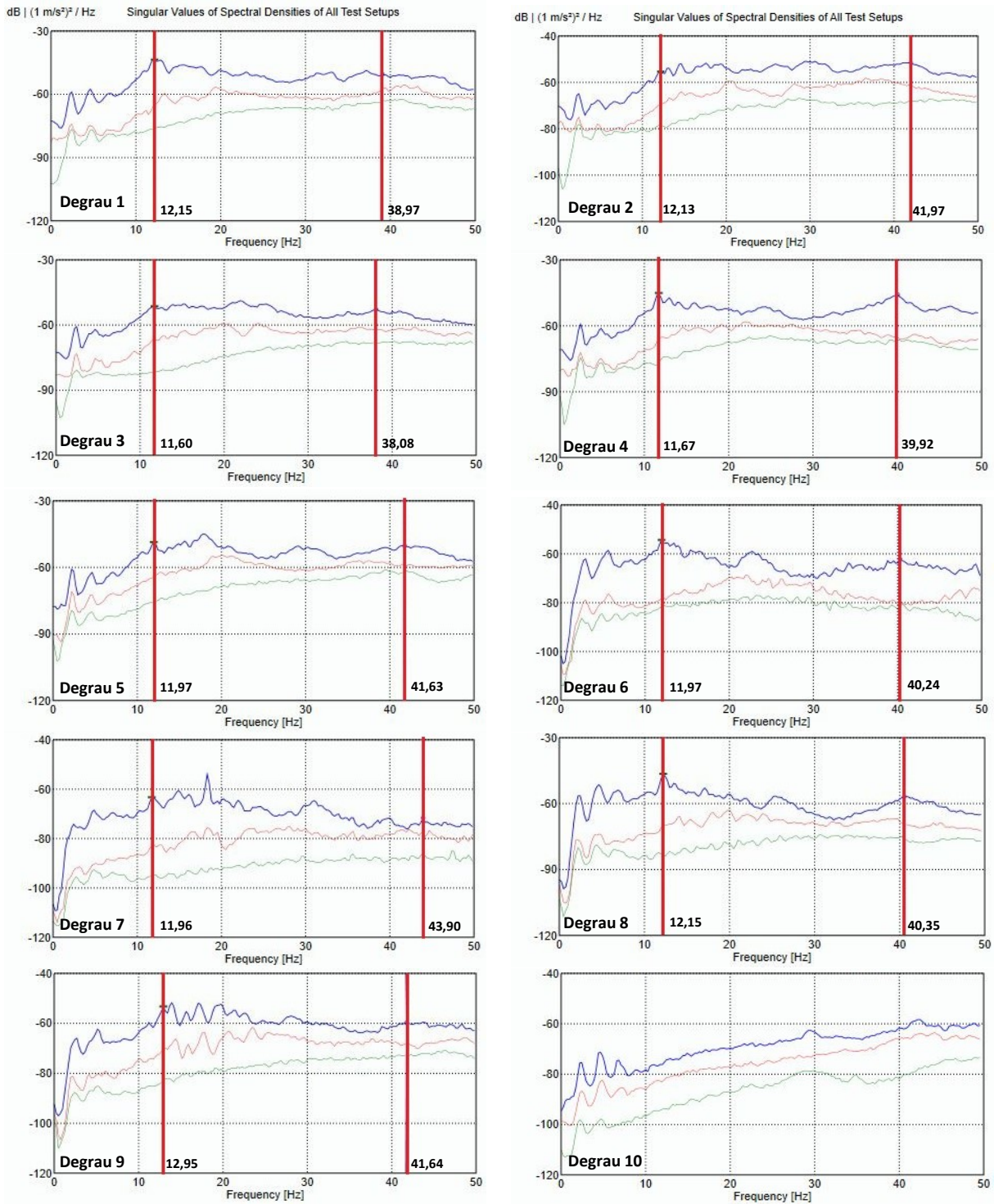


Figura 7: Método EFDD - fase 2: valores singulares médios e normalizados da matriz dos espetros.

A análise da figura permite constatar que as frequências de vibração dos modos 1 e 5 têm valores bastante próximos entre os diversos degraus, no entanto, a variação dos valores das frequências do modo 1 (entre 11,60 Hz e 12,95 Hz) é bastante inferior à variação registada para o modo 5 (entre 38,08 Hz e 43,90 Hz).

A variabilidade dos valores de ambas as frequências pode ser justificada por diferenças da rigidez dos degraus, possivelmente relacionadas com diferenças das características da ligação entre os degraus, e dos apoios dos degraus na viga de bancada. Estas diferenças foram identificadas numa inspeção visual realizada aos degraus de bancada [10].

Importa ainda salientar que as curvas de valores singulares obtidas para o degrau 10 tem uma configuração distinta das curvas obtidas para os restantes degraus ensaiados. Este degrau está diretamente apoiado em paredes que lhe conferem um aumento da rigidez significativo, e por isso as suas configurações modais são distintas das configurações modais dos restantes degraus.

Na Figura 8 apresentam-se os valores dos coeficientes de amortecimento do modo 1 obtidos para os degraus ensaiados (1 a 10) por aplicação do: i) método EFDD, e ii) método do decremento logarítmico (DL) [11].

O método do decremento logarítmico é baseado na análise dos registos de acelerações em vibração livre, devido à atuação da força impulsiva, e envolve a aplicação de um filtro do tipo passa-banda ao registo de acelerações, em torno da frequência do modo para o qual se pretende estimar o coeficiente de amortecimento, seguido do ajuste de uma função exponencial do tipo $a = C \cdot e^{-\xi\omega t}$ aos máximos do registo filtrado. Na função referida a é a aceleração, C é uma constante, ω é a frequência angular e ξ o coeficiente de amortecimento.

Na Figura 9, a título exemplificativo, ilustra-se a aplicação deste método na determinação do coeficiente de amortecimento do modo 1, considerando 5 ciclos da zona inicial ou de uma zona intermédia da resposta em vibração livre do degrau 1.

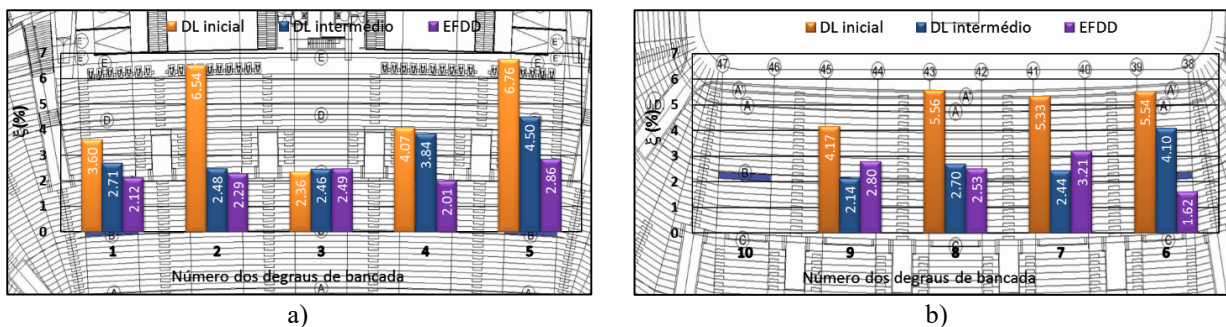


Figura 8: Valores dos coeficientes de amortecimento obtidos pelos métodos EFDD e decremento logarítmico: a) bancada norte; b) bancada sul

A observação dos resultados permite constatar que os valores dos coeficientes de amortecimento calculados considerando a zona inicial da resposta em vibração livre (valor médio dos 9 degraus igual a 4,90 %) são geralmente superiores aos calculados considerando uma zona intermédia (valor médio dos 9 degraus igual a 2,85 %). Este resultado corrobora a tendência de crescimento do amortecimento com o aumento do nível de vibração.

Por outro lado, na maioria das situações, as estimativas dos coeficientes de amortecimento obtidas através do método EFDD (valor médio dos 9 degraus igual a 2,60 %) têm valores próximos das estimativas obtidas por intermédio do método do decremento logarítmico considerando a zona intermédia da resposta.

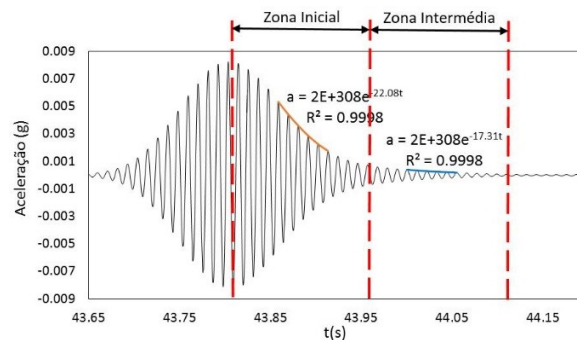


Figura 9: Método do decremento logarítmico: registo de acelerações filtrado para ação impulsiva no degrau 1

5. CONCLUSÕES

Este artigo incidiu na avaliação experimental das propriedades dinâmicas dos degraus de bancada do Estádio do Dragão com base em ensaios dinâmicos.

A fase 1 dos ensaios foi realizada a um conjunto de degraus da bancada sul do estádio e possibilitou a identificação de cinco modos de vibração locais, envolvendo sobretudo movimentos acoplados de flexão e torção dos degraus, com frequências situadas entre 12,15 Hz e 40,35 Hz.

A fase 2 dos ensaios foi realizada em 10 degraus individuais das bancadas norte e sul, com idêntica geometria, e permitiu avaliar a variabilidade dos valores das frequências de modos de vibração de flexão dos degraus, e possibilitou constatar, entre outros aspetos, que as frequências do 1º modo de flexão local dos degraus variam entre 11,60 Hz e 12,95 Hz. Esta variabilidade está possivelmente relacionada com diferentes características da ligação entre os degraus, e dos apoios dos degraus na viga de bancada, que em algumas situações foram identificadas numa inspeção visual.

As estimativas dos coeficientes de amortecimento do 1º modo de flexão do degrau foram obtidas por aplicação do método EFDD e do método do decremento logarítmico considerando 5 ciclos das zonas inicial e intermédia da resposta em vibração livre de cada degrau de bancada. Os valores calculados através do método do decremento logarítmico para uma zona inicial apresentam uma variação compreendida no intervalo [4,17 – 4,56] %, enquanto para uma zona intermédia apresentam uma variação compreendida no intervalo [2,14 – 4,10] %. Os resultados demonstraram um aumento significativo do amortecimento com o aumento do nível de vibração demonstrando a existência de não linearidades associadas a alguns dos componentes do sistema.

Como desenvolvimentos futuros os autores pretendem avaliar experimentalmente a influência da presença de público nos parâmetros modais dos degraus de bancada. Adicionalmente está ainda prevista a realização de um ensaio dinâmico sob ação de público com a medição das forças aplicadas pelos indivíduos e das respostas em acelerações dos degraus de bancada. Os resultados destes ensaios serão utilizados na validação de modelos numéricos dos degraus de bancada sob ação de movimentos controlados de público com base na implementação de análises dinâmicas que incluam a interação público-estrutura e que atendam a eventuais não linearidades do sistema dinâmico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Porto Estádio, em particular ao Eng. Ricardo Carvalho, por toda a informação disponibilizada sobre o Estádio do Dragão e por todo o apoio e facilidades concedidas na realização das campanhas experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] SCOSS, “Thirteenth Report of SCOSS - The Standing Committee on Structural Safety, Strutural Safety 2000-01,” London, UK, 2001.
- [2] T. Ji, J. Littler, and B. Ellis, “The response of grandstands to dynamic crowd loads,” *Proc. ICE - Structures and Buildings*, vol. 140, pp. 355–365, 2000.
- [3] P. Reynolds and A. Pavic, “Modal testing of a sports stadium,” in *20th International Modal Analysis Conference*, 2002, vol. 2, pp. 1037–1043.
- [4] A. Cigada, A. Caprioli, and M. Redaelli, “Numerical Modeling and Experimental Modal Analysis of a Concrete Grand-stand Structure to Structural Health Monitoring Purposes,” in *Proceedings of the international conference IMAC XXVI*, 2007.
- [5] H. Marques, A. Arêde, and R. Delgado, “Vibration monitoring of a grandstand in Dragon Stadium,” in *EVACES07 - Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 2007, pp. 503–512.
- [6] P. Marovic, M. Galic, and M. Bertolino, “Experimental testing of grandstand RC girders of the Spaladium Arena in Split,” in *2009 Montanuniversität Leoben/Austria*, 2009, no. September 23rd-26th, p. 145.
- [7] G. Lima, S. Avila, and G. Doz, “Numerical Dynamic Analysis of the New Brasilia National Stadium,” in *11th International Conference on Vibration Problems*, 2013, no. September, pp. 9–12.
- [8] G. Saudi, P. Reynolds, M. Zaki, and H. Hodhod, “Finite-Element Model Tuning of Global Modes of a Grandstand Structure Using Ambient Vibration Testing,” *ASCE J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 23, no. 6, pp. 467–479, 2009.
- [9] SVS, “ARTeMIS Extractor Pro 2011, Release 5.4.” 2011.
- [10] J. Leite, “Avaliação experimental e numérica do comportamento dinâmico dos degraus de bancada do Estádio do Dragão,” ISEP, 2016.
- [11] D. Ribeiro, “Efeitos dinâmicos induzidos por tráfego em pontes ferroviárias: modelação numérica, calibração e validação experimental,” FEUP, 2012.

ANEXO III – INTERFACE - ROBOT –EXCEL (ROBOT API)

Início da rotina API com identificação dos campos da folha de excel para descarga de dados provenientes do Autodesk Robot:

```
Sub Modos_Robot()  
Range("Célula_inicio: Célula_fim").ClearContents  
Application.DisplayAlerts = False  
  
Dim Robot As New RobotApplication
```

Comandos para ignorar mensagem de abertura do robot para alteração de mensagens:

```
Robot.Project.CalcEngine.AutoFreezeResults = False  
Robot.Project.Structure.ResultsFreeze = False
```

Identificação das características dos materiais correspondendo à sua posição nas células da folha de excel:

```
MaterialName = "Nome_Material"  
  
Set Label = Robot.Project.Structure.Labels.Create(I_LT_MATERIAL,  
MaterialName)  
  
Dim Material As RobotMaterialData  
Set Material = Label.data  
  
Material.Type = I_MT_CONCRETE  
Material.E = 210000000000# ' Young  
Material.E = Cells(Linha, Coluna).Value ' Young  
Material.NU = 0.2 ' Poisson  
Material.RO = 78500# ' Unit weight  
Material.RO = Cells(Linha, Coluna) ' Unit weight  
Material.Kirchoff = Material.E / (2 * (1 + 0.2)) 'G  
Robot.Project.Structure.Labels.Store Label  
(...)
```

Comandos para exportação de variáveis e importação de dados para o programa Robot:

```
Set obj1 = Nothing  
  
Robot.Project.CalcEngine.AnalysisParams.IgnoreWarnings = True  
Robot.Project.CalcEngine.Calculate  
  
Dim RDD As RobotDisplacementData  
Dim Nodes As RobotNodeServer  
Dim RES As RobotEigenvectorsServer  
Dim REV As RobotEigenvaluesServer  
  
Set Nodes = Robot.Project.Structure.Nodes  
Set RES = Robot.Project.Structure.Results.Advanced.Eigenvectors  
Set REV = Robot.Project.Structure.Results.Advanced.Eigenvalues
```

```

Modalcase = 3 ''''mudar para o número de caso de carga modal igual ao robot
NModes = Robot.Project.Structure.Cases.Get(Modalcase).ModesCount
Row = 10 'linha a partir da qual são descarregados os valores do ROBOT na
tabela de nós do excel

Dim myarray As Variant
myarray = Array(Identificar vetor linha de nós a importar do programa Robot)

For Modenum = 1 To NModes
For I = 0 To n

    NodeNumber = myarray(I)

Set RDD = RES.Value(NodeNumber, Modalcase, Modenum)
Cells(Row, n1) = Str(NodeNumber)
Cells(Row, n2) = Str(Modenum)
Cells(Row, n3) = REV.Value(Modalcase, Modenum).Frequence
Cells(Row, n4) = RDD.UX
Cells(Row, n5) = RDD.UY
Cells(Row, n6) = RDD.UZ
(...)

Row = Row + 1

Next I
Next Modenum

ActiveWorkbook.Save
Exit Sub

Application.DisplayAlerts = True

End Sub

```

ANEXO IV – ALGORITMO GENÉTICO

Definição dos vetores coluna dos limites inferiores (LB) e superiores (UB) das variáveis:

```
LB=[];  
UB=[];
```

Definição das variáveis a considerar nas opções do algoritmo genético:

```
nvars=length(UB);  
pop_initial=30;  
no_of_generations=100;  
no_of_stall_gen=100;  
n_of_elites=1;  
Tx_Migracao=0.05;  
Tx_Cruzamento=0.5;
```

Definição da população inicial – Método do Hipercubo Latino:

```
n = pop_initial; % number of samples  
p = nvars; % number of parameters  
xn = lhsdesign(n,p); % generate normalized design  
HipercuboLatino1 = bsxfun(@plus, LB, bsxfun(@times, xn, (UB-LB)));  
HipercuboLatino2=int32(HipercuboLatino1);  
HipercuboLatino=double(HipercuboLatino2);
```

Definição das funções a considerar nas opções do algoritmo genético:

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf,@gaplotbestindiv,@gaplotstopping,...  
@gaplotexpectation,@gaplotscorediversity,@gaplotgenealogy,@gaplotscores,...  
@gaplotdistance,@gaplotrange,@gaplotselection},...  
'InitialPopulation',HipercuboLatino,...  
'PopulationSize',pop_initial,...  
'SelectionFcn',@selectionstochunif,...  
'CrossoverFcn',@crossoverscattered,...  
'CrossoverFraction',Tx_Cruzamento,...  
'MigrationFraction',Tx_Migracao,...  
'Generations',no_of_generations,...  
'StallGenLimit',no_of_stall_gen,...  
'EliteCount',n_of_elites,...  
'FitnessLimit',0);  
  
IntCon = [1 2 3 (...) n_parâmetros];  
[x,fval,exitflag,output,population,scores] =  
ga(@Função_,nvars,[],[],[],[],LB,UB,[],IntCon,options);
```

