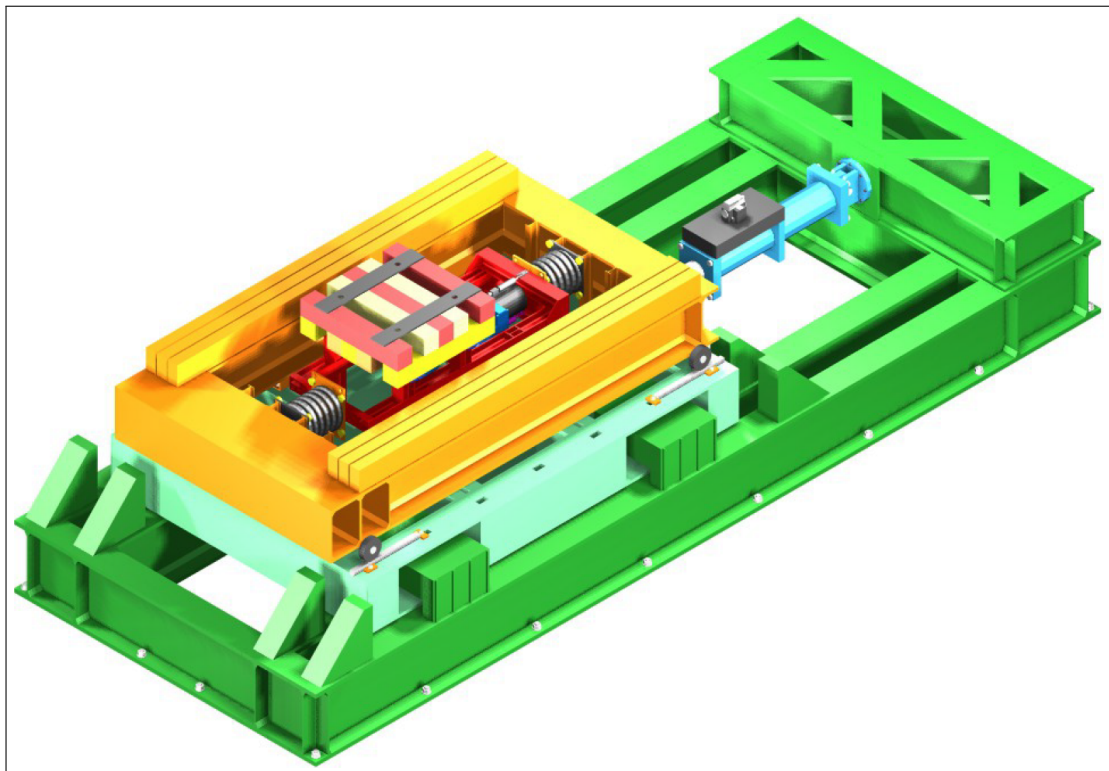


# Controlo de Plataforma Sísmica

PROJETO DE SISTEMAS MECATRÓNICOS



Afonso Costa Henrique

[afonso.henrique@tecnico.ulisboa.pt](mailto:afonso.henrique@tecnico.ulisboa.pt)

[GitHub Repository](#) & [Overleaf Report](#)

Orientadores:

Miguel Ayala Botto - [ayalabotto@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ayalabotto@tecnico.ulisboa.pt)

Fernando Pires de Oliveira - [fvoliveira@lnec.pt](mailto:fvoliveira@lnec.pt)

## Contents

<b>1</b>	<b>Definição do Problema</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Definição de Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Revisão do Estado da Arte</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Modelação Matemática</b>	<b>4</b>
4.1	Modelo 1-DOF . . . . .	4
4.2	Modelo 2-DOF . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Identificação de Sistema</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Metodologia de Ensaios Sísmicos no LNEC</b>	<b>6</b>
6.1	O modelo em anel fechado com controlador PID . . . . .	6
6.2	Identificação dinâmica . . . . .	6
6.3	Geração do sinal de comando . . . . .	6
6.4	Construção do espectro de resposta . . . . .	6
6.5	Análise do método como um todo . . . . .	6
6.6	Análise do sistema com o modelo matemático construído . . . . .	6
6.7	Avaliação do comportamento sob ações sísmicas . . . . .	6
6.8	Avaliação do método de geração do sinal de comando . . . . .	6
6.9	Resumo do Método de Ensaio no LNEC . . . . .	6
<b>7</b>	<b>Instalação Experimental</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>Formação em LabView</b>	<b>7</b>
<b>9</b>	<b>Validação Experimental do Sistema</b>	<b>7</b>
9.1	Configuração dos Ensaios . . . . .	7
<b>10</b>	<b>Definição da Instrumentação e Calibração do Sistema</b>	<b>7</b>
10.1	Ensaio de Validação do Modelo 1-DOF . . . . .	7
10.2	Ensaio de Validação do Modelo 2-DOF . . . . .	7
10.3	Avaliação do Desempenho do Controlador PID . . . . .	7
10.4	Testes com Diferentes Tipos de Sinais . . . . .	7
10.5	Geração do Espectro de Resposta Experimental . . . . .	7
<b>11</b>	<b>Relatório Final e Apresentação</b>	<b>7</b>
11.1	Elaboração do Relatório Final . . . . .	7
11.2	Apresentação dos Resultados . . . . .	8

## 1 Definição do Problema

O atual processo de realização de ensaios em plataforma sísmica no LNEC consiste na sintetização *offline* de um sinal de comando (drive), distinto do sinal de referência, de modo a que a plataforma vibre de acordo com o sinal de referência, ou seja, o sismo. O sistema composto pela plataforma sísmica e a estrutura a testar utiliza um controlador PI (Proporcional-Integral) com parâmetros fixos.

Durante o ensaio sísmico, a estrutura é submetida a um conjunto de testes com diferentes amplitudes do sismo. Inicialmente, realiza-se o teste com o sismo a uma amplitude reduzida, avaliando-se os danos subsequentes. De seguida, repete-se o procedimento com o mesmo sismo, mas a uma amplitude superior, avaliando novamente os danos, e assim sucessivamente até atingir uma amplitude definida, que normalmente corresponde à amplitude original do sismo.

Antes de cada teste, é efetuada uma identificação dinâmica do sistema, utilizando um sinal de Ruído Branco de Banda Limitada, sempre com a mesma amplitude, para determinar a Função de Transferência do Sistema. Esta função é então utilizada no algoritmo de geração do sinal de comando. Ao longo deste processo, a amplitude do sinal de referência aumenta progressivamente, e é expectável que a estrutura entre num regime não linear, quer devido ao comportamento de alguns dos seus componentes, quer pelo dano acumulado durante os vários testes.

No final de cada teste, o desempenho do sistema é avaliado pela comparação do espectro de resposta do sinal de referência com o do sinal medido na plataforma. Contudo, nem sempre é possível alcançar um desempenho satisfatório com o sinal de comando sintetizado inicialmente, podendo ser necessário gerar mais do que um sinal de comando e realizar ensaios adicionais à mesma amplitude. Este procedimento, embora necessário em algumas situações, deve ser evitado por induzir dano adicional na estrutura.

Adicionalmente, o sistema enfrenta limitações físicas inerentes ao equipamento, nomeadamente no que respeita ao campo finito de deslocamento, velocidade e aceleração, que devem ser devidamente considerados durante os ensaios.

## 2 Definição de Objetivos

Implementar o controlador ou estratégia que permita garantir que as vibrações da plataforma reproduzem, com a máxima precisão, o sinal sísmico de teste (referência/sismo), tendo em consideração os seguintes aspetos:

- A amplitude do sismo aumenta progressivamente em cada teste durante a campanha experimental;
- Antes de cada teste, é efetuada uma identificação dinâmica do sistema a uma amplitude reduzida (para evitar danos no modelo). Um objetivo será avaliar a viabilidade de utilizar a resposta ao sismo para identificar, ou complementar o modelo identificado, e abranger amplitudes mais elevadas.
- O sinal de comando, gerado *offline*, é imposto na plataforma sísmica sem avaliação prévia por simulação quanto à sua eficácia;
- O sistema da plataforma sísmica com 1 grau de liberdade (ST1D) é capaz de testar modelos com massa até 5 toneladas, e opera numa banda de interesse de 0 a 25 Hertz. Apresenta ainda as seguintes limitações (que deverão ser confirmadas em ensaios laboratoriais):
  - Deslocamento máximo, em valor absoluto, de 100 mm
  - Velocidade máxima, em valor absoluto, de 0.4 m/s
  - Aceleração máxima, em valor absoluto, de 25 m/s<sup>2</sup>
- O modelo a ensaiar pode inicialmente apresentar comportamento linear, mas à medida que se degrada, torna-se inevitavelmente não linear. Em geral, as estruturas testadas possuem dois modos de vibração na banda de interesse da plataforma sísmica, cujas características iniciais (sem dano) são:
  - ◊  $1.5 \leq f_1(\text{Hz}) \leq 4$
  - ◊  $2 \leq \xi_1(\%) \leq 5$
  - ◊  $6 \leq f_2(\text{Hz}) \leq 10$
  - ◊  $5 \leq \xi_2(\%) \leq 15$
  - ◊ O amortecimento em estruturas danificadas pode atingir:
    - \*  $\xi_1 = 10\%$
    - \*  $\xi_2 = 25\%$
- O desempenho será avaliado pela comparação entre o espectro de resposta do sinal medido e o do sinal de referência.

## 3 Revisão do Estado da Arte

Realizar uma pesquisa abrangente sobre técnicas para ensaios sísmicos, com foco em ensaios em plataforma sísmica. Incluir uma análise dos métodos de ensaio, configurações de montagem, bem como da instrumentação utilizada para medição e controlo dos equipamentos.

Symbol	Description	Value (Units)
$k_p$	Proportional gain of the controller	1.2993 V/cm
$k_{sv}$	Servo-valve gain	1934.50 cm <sup>3</sup> /s/V
$\tau_{sv}$	Time-delay parameter of the servo-valve transfer function	0.0246 s
$k_q$	Valve flow gain	1934.50 cm <sup>3</sup> /s/V
$k_c$	Valve pressure-flow gain	8.37005 × 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /s/kPa
$C_l$	Total leakage coefficient of the piston	8.37005 × 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /s/kPa
$A$	Area of the fluid under compression in the actuator	0.012456 m <sup>2</sup>
$V_t$	Total volume of the fluid under compression in the actuator	0.002659 m <sup>3</sup>
$\beta_e$	Effective bulk modulus of the system	193716.28 kPa
$K_h$	Oil-column frequency of the actuator	4531.79 kPa/m
$m_p$	Mass of the platen	1.9751 ton
$c_t$	Combined damping force of the actuator and the platen	5.7800 kNs/m
$k_{sp}$	Stiffness of the SDOF structure	Assumed value
$c_{sp}$	Damping of the SDOF structure	Assumed value
$m_t^*$	Total mass considering the payload (shaking table)	Calculated value
$H_{sp}$	Transfer function relating the displacements of the platen and the SDOF structure	Function-defined

Table 1: Parameter definitions and values.

## 4 Modelação Matemática

Os modelos devem ser implementados em Matlab/Simulink e complementados com funções, scripts e interfaces que facilitem a parametrização, cálculo de propriedades (como modos de vibração), análise e simulação com diferentes tipos de entradas (sinais sinusoidais, ondas quadradas e inputs externos como sinais sísmicos).

### 4.1 Modelo 1-DOF

Pesquisar modelos matemáticos que reproduzam o comportamento dinâmico de plataformas sísmicas acionadas por sistemas óleo-hidráulicos. Compreender o funcionamento do equipamento da plataforma sísmica ST1D e modelar os principais componentes que contribuem para o seu comportamento dinâmico.

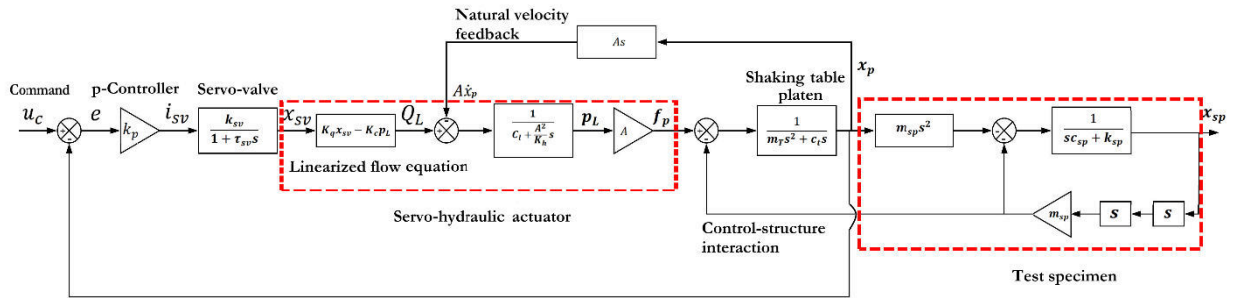


Figure 1: Gidewon\_block\_diagram.png

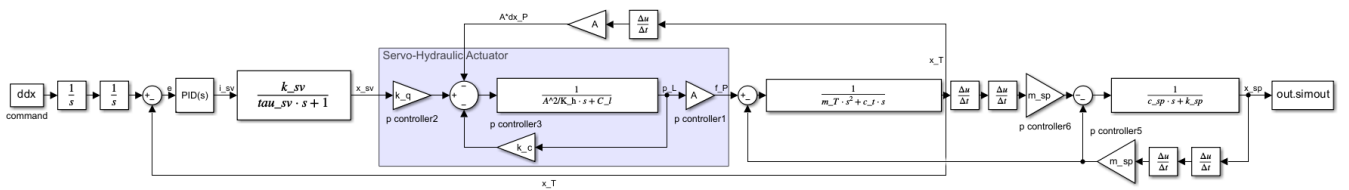


Figure 2: simulink\_1dof\_model.png

$$H_{1DoF} = \frac{-m_{sp}s^2}{m_{sp}s^2 + c_{sp}s + k_{sp}}$$

$$m_t = m_p + m_{sp} (1 + H_{sp})$$

$$G_{xr} = \frac{10^{-4} A k_h k_p k_s v_k q}{10^{-4} A k_h k_p k_s v_k q + s (st_{sv} + 1) (A^2 c_{tm} s + A^2 k_h + A^2 m_t s^2 + k_{pl} c_{tm} k_h + k_{pl} k_h m_t s)}$$

$$G_{ol} = \frac{x_p}{i_{sv}} = \frac{10^{-4} A k_h k_s v_k q}{s (st_{sv} + 1) (A^2 c_{tm} s + A^2 k_h + A^2 m_t s^2 + k_{pl} c_{tm} k_h + k_{pl} k_h m_t s)}$$

$$G_{cl} = \frac{G_{ol} \cdot k_p}{1 + G_{ol} \cdot k_p}$$

## 4.2 Modelo 2-DOF

Definir o modelo 2-DOF massa-mola-amortecedor da estrutura associada à plataforma, que simula o comportamento dinâmico da estrutura a ensaiar. Este modelo deverá considerar as características previamente definidas e incluir a possibilidade de introdução de não linearidades.

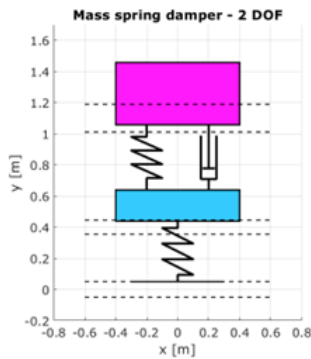


Figure 3

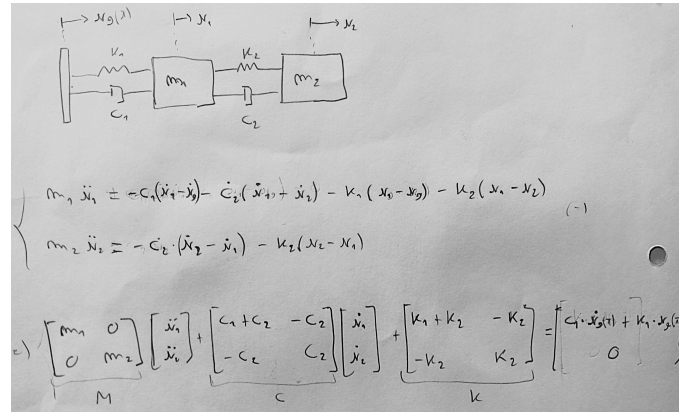


Figure 4

As equações do sistema são:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_g) - c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_g) - k_2(x_1 - x_2),$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1).$$

Em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 \dot{x}_g - k_1 x_g \\ 0 \end{bmatrix}.$$

## 5 Identificação de Sistema

Listing 1: Function in the Simulink MATLAB Function Block named Collision

```

1 %% Create a discrete-time neural state-space object with
2 % 6 states: xig xsi ai as
3 states = 4
4 % 2 inputs: xg , ag
5 Num_I=2
6 U = [xg ag];
7 U_train = U(1: ceil( length(time)/2 ) , : );
8 U_test = U(ceil( length(time)/2 ) + 1 : end , : );
9 % 4 outputs: xig xsi ai as
10 Num_O=4
11 Y = [ xig xsi ai as];
12 Y_train = Y(1: ceil( length(time)/2 ) , : );
13 Y_test = Y(ceil( length(time)/2 ) + 1 : end , : );
14 % sample time of dt seconds.
15
16
17 train_data = iddata( Y_train , U_train , dt )
18 test_data = iddata( Y_test , U_test , dt )
19 test_data.Tstart= time(ceil( length(time)/2 ))
20 % figure
21 % plot(train_data)
22 % hold on
23 % plot(test_data)
24 % legend('train','test')
25
26 test_data.Tstart= time(ceil( length(time)/2 ))
27 data = iddata( Y , U , dt )
28
29 %% Power Spectral Density
30 %
31 inputSignal = data.u; % Input signal
32 outputSignal = data.y; % Output signal
33 Fs = 1 / data.Ts; % Sampling frequency
34
35 % Plot PSD for input signal
36 figure;
37 subplot(2, 1, 1);
38 pspectrum(inputSignal, Fs, 'power');
```

```

39 | title('Power Spectral Density of Input Signals');
40 |
41 | % Plot PSD for output signal
42 | subplot(2, 1, 2);
43 | pspectrum(outputSignal, Fs, 'power');
44 | title('Power Spectral Density of Output Signals');
45 |
46 |
47 | %% Deep Cascade Network
48 | net=cascadeforwardnet([6,6,6,6,6,6])
49 | N2=neuralnet(net)
50 |
51 | %%
52 | N_A = 10*ones(Num_O)
53 | N_B = 10*ones(Num_O,Num_I)
54 | N_K = zeros(Num_O,Num_I)
55 |
56 | % opt = nlarxOptions
57 | % opt.SearchOptions.MaxIterations = 10
58 | mN2=nlarx(data,[N_A N_B N_K ],N2)

```

## 6 Metodologia de Ensaios Sísmicos no LNEC

Compreender a metodologia de ensaios sísmicos utilizada no LNEC e desenvolver funções e modelos em Matlab/Simulink que reproduzam os ensaios em ambiente de simulação.

### 6.1 O modelo em anel fechado com controlador PID

Descrever e analisar o modelo do sistema em anel fechado utilizando um controlador PID.

### 6.2 Identificação dinâmica

Realizar a identificação dinâmica do sistema para caracterizar as suas propriedades dinâmicas.

### 6.3 Geração do sinal de comando

Desenvolver e avaliar algoritmos para a geração do sinal de comando.

### 6.4 Construção do espectro de resposta

Construir o espectro de resposta do sistema e utilizá-lo para análise de desempenho.

### 6.5 Análise do método como um todo

Realizar uma avaliação abrangente da metodologia adotada.

### 6.6 Análise do sistema com o modelo matemático construído

Utilizar métodos analíticos como Lugar das Raízes (LGR) ou diagramas de Bode para estudar o comportamento do sistema baseado no modelo matemático desenvolvido.

### 6.7 Avaliação do comportamento sob ações sísmicas

Examinar o desempenho do sistema perante ações sísmicas e identificar as suas vantagens e limitações.

### 6.8 Avaliação do método de geração do sinal de comando

Avaliar a eficácia e eficiência do método de geração do sinal de comando.

### 6.9 Resumo do Método de Ensaio no LNEC

Os ensaios realizados no LNEC visam avaliar a vulnerabilidade estrutural, verificando a evolução dos danos com o aumento da severidade sísmica. A metodologia consiste nos seguintes passos:

1. **Definição do sinal sísmico de referência:** Estabelecer o sinal de referência (deslocamento, velocidade e aceleração).
2. **Identificação do sistema:** Determinar a Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema plataforma + modelo.
3. **Geração do sinal de comando:** Criar o sinal de Drive utilizando o método *Online Iteration*, com base no sinal de referência e no modelo identificado.
4. **Execução do ensaio sísmico:** Aplicar o sinal de comando ao sistema em anel fechado.
5. **Avaliação do desempenho:** Comparar os espectros de resposta do sinal medido e do sinal de referência.

6. **Iteração ou término:** Repetir o procedimento para maior amplitude ou encerrar a campanha se o último nível for atingido.

## 7 Instalação Experimental

Concluir a instalação da plataforma sísmica ST1D, incluindo os sistemas hidráulico e de automação. Compreender o funcionamento do sistema de medição e controlo, que utiliza equipamento National Instruments e programação em LabView. Implementar e analisar o controlador PID em cascata com retroação de deslocamento e força.

## 8 Formação em LabView

Participar na formação organizada pelo LNEC para desenvolver competências em LabView, necessárias para a posterior implementação do controlador otimizado na plataforma ST1D.

## 9 Validação Experimental do Sistema

Realizar os ensaios experimentais para validar os modelos desenvolvidos e o funcionamento da plataforma sísmica ST1D.

### 9.1 Configuração dos Ensaios

Configurar a plataforma com base nos requisitos previamente definidos, incluindo a definição de parâmetros como amplitude, frequência e tipo de entrada para o controlador.

## 10 Definição da Instrumentação e Calibração do Sistema

Proceder à definição da instrumentação a utilizar nos ensaios, calibrar os sensores com recurso a padrões de referência metrológicos, e parametrizar curvas de calibração na aplicação para operação e controlo da plataforma sísmica;

### 10.1 Ensaios de Validação do Modelo 1-DOF

Realizar testes experimentais utilizando o modelo 1-DOF e comparar os resultados obtidos com os previstos pelos modelos matemáticos desenvolvidos em Matlab/Simulink.

### 10.2 Ensaios de Validação do Modelo 2-DOF

Reproduzir cenários dinâmicos mais complexos com o modelo 2-DOF e analisar o desempenho da plataforma e a precisão do modelo em prever a resposta estrutural.

### 10.3 Avaliação do Desempenho do Controlador PID

Estudar o comportamento do sistema com o controlador PID implementado, comparando as respostas esperadas e observadas em condições reais.

### 10.4 Testes com Diferentes Tipos de Sinais

Avaliar a resposta da plataforma com diferentes tipos de entradas, incluindo sinais harmónicos, aleatórios e sinais sísmicos reais.

### 10.5 Geração do Espectro de Resposta Experimental

Obter o espectro de resposta experimental e comparar com os resultados teóricos e de simulação, analisando discrepâncias e ajustando os modelos conforme necessário.

## 11 Relatório Final e Apresentação

Elaborar o relatório final e preparar a apresentação do trabalho desenvolvido.

### 11.1 Elaboração do Relatório Final

Preparar um documento detalhado que inclua:

- Descrição do trabalho realizado e do progresso alcançado;
- Modelos matemáticos desenvolvidos e resultados das simulações;
- Metodologia de ensaios sísmicos implementada;
- Validação experimental e análise de resultados;
- Identificação de limitações e propostas de trabalhos futuros.

## **11.2 Apresentação dos Resultados**

Preparar uma apresentação que resuma o trabalho e destaque as principais conclusões, destinada a um público técnico e/ou académico.



## References

- [1] Oliveira, F. Semi-active systems for structural vibration mitigation. PhD Thesis, Técnico, 2015.
- [2] Tekeste, G. G. Real-time hybrid simulation including a shaking table: development and application to soil-structure interaction. PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 2021. URI: <http://hdl.handle.net/10773/32045>.
- [3] Williams, M. S., & Blakeborough, A. Laboratory testing of structures under dynamic loads: an introductory review. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 359:1651–1669, 2001. DOI: <http://doi.org/10.1098/rsta.2001.0860>.
- [4] Silva, C. E., Gomez, D., Maghareh, A., Dyke, S. J., & Spencer, B. F. Benchmark control problem for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 135, 2020. Article ID: 106381, ISSN 0888-3270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106381>.
- [5] Phillips, B., & Spencer, B. Model-Based Servo-Hydraulic Control for Real-Time Hybrid Simulation. University of Illinois at Urbana-Champaign: NSEL Report Series, June 2011.
- [6] Carrion, J., & Spencer, B. Model-based Strategies for Real-time Hybrid Testing. University of Illinois at Urbana-Champaign: NSEL Report Series, December 2007.
- [7] You, S., Gao, X. S., Thoen, B., French, C., Cosgriff, E., & Bergson, P. Cascade Control for Hybrid Simulation. MTS Systems Corporation / University of Minnesota, *WCEE2024*, 2024.
- [8] Marques, J. Análise do Comportamento Dinâmico de uma Plataforma Sísmica e de um Pórtico em Betão Armado e a sua Evolução com o Dano Acumulado. MSc Thesis, ISEL, 2016.
- [9] Ogata, K. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, Inc., 1970.
- [10] Preumont, A. *Vibration Control of Active Structures – An Introduction (2nd edition)*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [11] Maciejowski, J. M. *Predictive Control with Constraints*. Pearson Education Limited, 2002.
- [12] Chastre, C., Neves, J., Ribeiro, D., Neves, M., & Faria, P. Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. *Geotechnics, Transportation, Hydraulics and Natural Resources*, Wiley, 2022. DOI: [10.1007/978-3-031-05875-2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2).
- [13] Carvalho, E. C. C. Seismic Testing of Structures. *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam, 1998.