



Guião das Aulas Práticas

Mecânica Clássica

2021/2022

Índice do guião

| | |
|---|-----------|
| <i>Informação Genérica.....</i> | <i>2</i> |
| <i>Avaliação</i> | <i>3</i> |
| <i>Docentes das aulas práticas</i> | <i>6</i> |
| <i>Instruções para a preparação dos minirrelatórios</i> | <i>7</i> |
| <i>Planificação aulas</i> | <i>10</i> |
| <i>Horário da Disciplina</i> | <i>11</i> |
| <i>Trabalho 1 - Movimento de Projéteis.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Trabalho 2 - Viscosidade de um Líquido.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Trabalho 3 - Conservação da energia mecânica</i> | <i>15</i> |
| <i>Trabalho 4 - Pêndulos acoplados.....</i> | <i>25</i> |

Informação Genérica

As aulas práticas laboratoriais são dedicadas a trabalho de laboratório com 4 trabalhos experimentais de mecânica e subdividem-se em turmas tipicamente com 15 alunos, sendo os trabalhos experimentais realizados em grupo (3 alunos por grupo).

O laboratório está equipado com computadores de modo a promover a utilização de ferramentas computacionais na aquisição, tratamento e análise dos dados experimentais. Os alunos podem igualmente levar o seu computador portátil e/ou máquina de calcular gráfica. Na componente laboratorial o desempenho do aluno é avaliado de forma cumulativa através de três mini relatórios incidindo sobre trabalhos diferentes (peso de 60%), desempenho individual (peso de 10%) e uma apresentação oral (peso de 30%)

Na impossibilidade de aulas presenciais devido à pandemia SARS-CoV-2 e seguindo as normas definidas em despacho reitoral, as aulas poderão ser lecionadas à distância por videoconferência. No caso particular das aulas práticas laboratoriais, poderão ser fornecidas aos alunos tabelas de dados experimentais de modo a possibilitar a realização dos respetivos relatórios. Todos os elementos de avaliação poderão ser realizados à distância, caso seja necessário.

Avaliação

A nota final da componente laboratorial é calculada do seguinte modo:

- Avaliação do desempenho individual (peso de 10%);
- Apresentação oral (peso de 30%);
- Mini relatórios de grupo (peso de 60%);

i. Avaliação do desempenho individual

Os parâmetros a considerar na avaliação desta componente são os seguintes:

- Pesquisa / nível de preparação do trabalho prático;
- Espírito de iniciativa e interesse nas aulas práticas;
- Assiduidade, pontualidade, responsabilidade;
- Desempenho laboratorial;
- Desempenho na análise e tratamento de dados;
- Compreensão da situação física em estudo.

ii. Apresentação oral

Cada grupo irá realizar 4 trabalhos práticos (T1-T4), sendo o primeiro (T1) apenas formativo. A nota na componente “Apresentação oral” resulta da apresentação e discussão de um dos 3 trabalhos de avaliação (T2-T4), a ser indicado pelo docente. Será disponibilizado um videoprojector e todos os elementos do grupo terão de participar na apresentação, **sendo a nota atribuída individualmente**.

iii. Mini relatório de grupo

De cada trabalho prático realizado, cada grupo terá de entregar um mini relatório. O mini relatório do primeiro trabalho T1 tem objetivos formativos e será realizado em articulação estreita com o docente. A estrutura e os critérios de classificação dos mini relatórios estão afixados na plataforma eLearning@UA e apresentados nesta secção. Cada grupo receberá indicação do docente sobre os trabalhos a realizar.

O mini relatório (e o ficheiro anexo, com dados experimentais, cálculos e gráficos) têm de ser entregues em formato eletrónico via eLearning@UA, até 24 horas após o fim da aula em que o trabalho é realizado.

Época de Recurso/melhoria

Os alunos que não obtiverem aproveitamento positivo à componente laboratorial da disciplina ou que queiram melhorar a nota desta componente, podem submeter-se a um exame da componente laboratorial na Época de Recurso/Melhoria, desde que previamente inscritos, quer nos Serviços Académicos, quer na Secretaria do Complexo Pedagógico. Este exame consta da realização de um teste individual (peso de 40%), um relatório completo sobre um dos trabalhos (peso de 30%) e uma prova oral sobre dois dos trabalhos que não o do relatório completo (peso de 30%).

Faltas nas aulas Práticas

Segundo o regulamento de estudos da UA em vigor, todos os alunos de 1ª inscrição e repetentes globais que faltassem a mais de 20% do número total de aulas práticas (mais do que 3 faltas), ficariam automaticamente reprovados por faltas, não podendo apresentar-se a qualquer exame da disciplina durante o ano letivo respetivo.

No entanto, o regime de faltas às aulas práticas (numéricas e laboratoriais) foi alterado devido à pandemia SARS-CoV-2 e no despacho reitoral Despacho n.º 53 - REIT/2020, foi fixado um novo limite, 50% do número total de aulas práticas.

Os docentes notificarão os alunos de qualquer alteração ao regime de faltas durante o semestre.

Estudantes Trabalhadores

Os estudantes trabalhadores não reprovam por faltas. Caso não tenham a possibilidade de frequentar ordinariamente o laboratório têm de realizar obrigatoriamente um exame laboratorial final (consta de elaboração de um relatório e apresentação oral do mesmo). Devem, entretanto, contactar os docentes da disciplina. Aos restantes aplica-se o disposto aos alunos ordinários.

Época de Recurso

Os alunos reprovados na época normal poderão realizar a Prova de Recurso, no mesmo ano letivo (de acordo com o R.E.L). Este exame será realizado nas componentes (teórico-prática ou laboratorial) a que teve nota negativa. A nota final será calculada com base na melhor das notas de cada componente.

Melhoria de classificação

A melhoria de classificação é permitida de acordo com o disposto no Regulamento de Estudos da Licenciatura.

Notas superiores a 16 valores

Os regentes reservam-se o direito de efetuarem provas complementares a alunos cuja nota final na disciplina seja superior a 16 valores.

Docentes das aulas práticas

Responsável pela componente prática – Paulo Antunes (pantunes@ua.pt)

Docentes por PL:

PL1 – Manuel Graça (mpfg@ua.pt)

PL2 – Lucília Santos (lucilia.santos@ua.pt)

PL3 – Filipe Figueiredo (lebre@ua.pt)

PL4 – Filipe Figueiredo (lebre@ua.pt)

PL5 – Manuel Graça (mpfg@ua.pt)

PL6 – Lucília Santos (lucilia.santos@ua.pt)

PL7 – Lucília Santos (lucilia.santos@ua.pt)

PL8 – Claude Boemare (claudio@ua.pt)

PL9 – Manuel Graça (mpfg@ua.pt)

PL10 – Manuel Graça (mpfg@ua.pt)

PL11 – Claude Boemare (claudio@ua.pt)

PL12 – Lucília Santos (lucilia.santos@ua.pt)

PL13 – Lucília Santos (lucilia.santos@ua.pt)

Instruções para a preparação dos mini relatórios

Cada grupo irá entregar 4 mini relatórios, um sobre cada trabalho prático realizado nas aulas de laboratório de Mecânica Clássica, com o **máximo de 2 páginas**. O mini relatório (e o ficheiro Anexo, com dados experimentais, cálculos e gráficos) têm de ser entregues **até 24 horas após o fim da aula** em que o trabalho é realizado.

A estrutura e os critérios de classificação dos mini relatórios são os seguintes:

Estrutura

O mini relatório, com um máximo de 2 páginas, contém a Identificação e 4 secções (Resultados, Discussão, Conclusões e Anexos)

a) Identificação (no início do relatório)

- Título do trabalho
- Autores (Nome, curso, turma e grupo)

b) Resultados

Não confundir com os dados, que são as medidas feitas no laboratório. Os resultados são o que resulta de trabalhar os dados. E trabalhar os dados é fazer gráficos, regressões lineares, propagações erros, etc. Os resultados tipicamente são gráficos ou valores de grandezas.

Se os resultados forem gráficos, devem aparecer no anexo ao relatório; neste caso, deve-se indicar ao leitor que veja os gráficos anexos.

Se os resultados forem valores de grandezas, p. ex. o valor de uma resistência, escreve-se apenas:

$$R = 101.5 \pm 0.3 \, \Omega \text{ (valor experimental)}$$

$$R = 100 \pm 1 \, \Omega \text{ (valor esperado)}$$

O valor esperado pode ser o valor nominal (indicado pelo fabricante) ou um valor calculado (p. ex, por análise de circuitos).

Todos os resultados devem ser apresentados com unidades e erros associados, devendo ser escritos, respetivamente, com o número de casas decimais e de algarismos significativos apropriados.

Todos os resultados relevantes para a secção “Discussão” devem estar aqui.

c) Discussão (ou Análise)

É a maior secção do relatório. Contém a análise pormenorizada dos resultados, chamando a atenção do leitor para aquilo que os autores acham relevante.

Se os resultados forem gráficos, a análise deve descrever os gráficos de tal maneira que estes sejam uma ilustração da análise.

Se os resultados forem valores de grandezas, esta secção do relatório deve discutir os erros (se a precisão é grande ou pequena) e comparar o valor obtido com o valor esperado (i.e., discutir a exactidão).

Além de analisar o que estiver na secção “Resultados”, deve também discutir eventuais problemas relacionados com o método experimental, os procedimentos ou o equipamento.

d) Conclusões

Deve ser o corolário lógico do que foi dito antes. Deve dizer em que medida os objectivos foram atingidos (portanto, não escrever coisas do género “pensamos que os objetivos foram atingidos” ...). É necessário, pois, ter em mente os objectivos do trabalho.

Deve incluir comentários sobre a fidelidade com que o modelo teórico descreve os resultados experimentais obtidos, sempre que apropriado, e discutir e introduzir melhorias no modelo teórico para uma descrição mais fiel dos resultados experimentais.

Análise das principais fontes de erro experimental e referência ao modo como poderia ser melhorada a precisão dos valores determinados experimentalmente.

Sugestões para melhorar a experiência (com o material da aula).

Conclusões baseadas nos resultados obtidos.

e) Anexos

Dados na forma de tabelas de valores lidos diretamente e/ou obtidos a partir destes por cálculos simples (valores médios, desvios, etc.). Devem ser acompanhadas das explicações e legendas necessárias à sua interpretação

Cálculos auxiliares das grandezas físicas a determinar e respectivos erros (p. ex., propagação de erros). Linearização de expressões para ajuste pelo método dos mínimos desvios quadráticos.

Gráficos (se feitos em papel milimétrico), caso contrário enviar apenas por email junto com o mini relatório. Os gráficos devem incluir Título, Escalas de fácil leitura, Unidades, Representação gráfica dos pontos experimentais e da expressão matemática de ajuste e Legenda (se necessária).

Crítérios de Classificação do Mini relatório

| Nível | Designação | Crítérios | Classificações |
|-------|------------|---|----------------|
| A | Muito Bom | Cumpre todos os pontos de {1,2,3,4} | 17-20 |
| B | Bom | Cumpre 1 e 2, mas falha um de {3a, 3b, 4}. | 13-16 |
| C | Aceitável | Cumpre 1 e 2, mas falha dois ou três de {3a}, | 9-12 |
| D | Inadequado | Falhas em 1 ou 2, e em um de {3a, 3b, 4}. | 0-8 |

| | |
|----------|---|
| 1 | Preenchimento do guia da experiência: |
| a) | Tabelas de dados completas (com incertezas e unidades). |
| b) | Cálculos, propagação de erros, regressão linear, gráficos (se aplicável) |
| 2 | Resultados |
| a) | Resultados experimentais razoáveis, com indicação das incertezas e da precisão |
| b) | Indicação do valor esperado e da sua incerteza. |
| 3 | Discussão |
| a) | Comenta precisão. |
| b) | Discute exatidão. |
| c) | Identifica principal fonte de erro |
| d) | Refere eventuais problemas relacionados com o método experimental, os procedimentos ou o equipamento. |
| 4 | Conclusão |
| | Indica em que medida os objetivos quantitativos foram atingidos |

Planificação aulas

| | |
|------------------|--|
| PL aula 1 | Apresentação sumária da componente PL, formação de grupos, introdução ao tratamento de dados experimentais, teoria de erros, linearização. Explicação do sistema de mini relatórios e dos critérios de correção. |
| PL aula 2 | Trabalho prático nº 1: Movimento de projéteis (Formativo) |
| PL aula 3 | Trabalho prático nº 2: Viscosidade de um líquido |
| PL aula 4 | Trabalho prático nº 3: Conservação de energia |
| PL aula 5 | Trabalho prático nº 4: Pêndulos acoplados |
| PL aula 6 | Apresentações orais |

| Turmas de 2ª feira | | Turmas de 3ª feira | | Turmas de 4ª feira | | Turmas de 5ª feira | | Turmas de 6ª feira | |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| data | aula | data | aula | data | aula | data | aula | data | aula |
| 11 Out 2021 | Acolhimento alunos | 12 Out 2021 | PL aula 1 | 13 Out 2021 | PL aula 1 | 14 Out 2021 | PL aula 1 | 15 Out 2021 | PL aula 1 |
| 18 Out 2021 | PL aula 1 | 19 Out 2021 | TP aula 1 | 20 Out 2021 | TP aula 1 | 21 Out 2021 | TP aula 1 | 22 Out 2021 | TP aula 1 |
| 25 Out 2021 | PL aula 2 | 26 Out 2021 | PL aula 2 | 27 Out 2021 | PL aula 2 | 28 Out 2021 | PL aula 2 | 29 Out 2021 | PL aula 2 |
| 01 Nov 2021 | Feriado | 02 Nov 2021 | TP aula 2 | 03 Nov 2021 | TP aula 2 | 04 Nov 2021 | TP aula 2 | 05 Nov 2021 | TP aula 2 |
| 08 Nov 2021 | PL aula 3 | 09 Nov 2021 | PL aula 3 | 10 Nov 2021 | PL aula 3 | 11 Nov 2021 | PL aula 3 | 12 Nov 2021 | PL aula 3 |
| 15 Nov 2021 | TP aula 1 | 16 Nov 2021 | TP aula 3 | 17 Nov 2021 | TP aula 3 | 18 Nov 2021 | TP aula 3 | 19 Nov 2021 | TP aula 3 |
| 22 Nov 2021 | PL aula 4 | 23 Nov 2021 | PL aula 4 | 24 Nov 2021 | PL aula 4 | 25 Nov 2021 | PL aula 4 | 26 Nov 2021 | PL aula 4 |
| 29 Nov 2021 | TP aula 2 | 30 Nov 2021 | TP aula 4 | 1 Dez 2021 | Feriado | 2 Dez 2021 | TP aula 4 | 3 Dez 2021 | TP aula 4 |
| 6 Dez 2021 | TP aula 3 | 7 Dez 2021 | TP aula 5 | 8 Dez 2021 | Feriado | 9 Dez 2021 | TP aula 5 | 10 Dez 2021 | TP aula 5 |
| 13 Dez 2021 | TP aula 4 | 14 Dez 2021 | TP aula 6 | 15 Dez 2021 | TP aula 4 | 16 Dez 2021 | PL aula 5 | 17 Dez 2021 | PL aula 5 |
| 20 Dez 2021 | PL aula 5 | 21 Dez 2021 | PL aula 5 | 22 Dez 2021 | PL aula 5 | 23 Dez 2021 | Férias Natal | 24 Dez 2021 | Férias Natal |
| 03 Jan 2022 | TP aula 5 | 04 Jan 2022 | TP aula 7 | 05 Jan 2022 | TP aula 5 | 06 Jan 2022 | TP aula 6 | 07 Jan 2022 | TP aula 6 |
| 10 Jan 2022 | PL aula 6 | 11 Jan 2022 | PL aula 6 | 12 Jan 2022 | PL aula 6 | 13 Jan 2022 | PL aula 6 | 14 Jan 2022 | PL aula 6 |
| 17 Jan 2022 | TP aula 6 | 18 Jan 2022 | TP aula 8 | 19 Jan 2022 | TP aula 6 | 20 Jan 2022 | TP aula 7 | 21 Jan 2022 | TP aula 7 |
| 24 Jan 2022 | TP aula 7 | | Intervalo Letivo | Época Exames | | | | | |

Horário da Disciplina

| | Segunda | | Terça | | Quarta | | | Quinta | | Sexta | | | |
|-------|--|---|--|---|--|---|--|--|--|---|--|---|--|
| 9:00 | | | MC 23.3.21 - Lab. Fis mpfg@ua.pt Manuel Pedro Fernandes Graca PL9 (PL) 2022-01-11 2021-12-21 2021-11-23 2021-11-09 2021-10-26 2021-10-12 | MC 5.2.53 rdias@ua.pt Ricardo Assis Guimarães Dias TP9 (TP) 2022-01-18 2021-12-14 2021-12-07 2021-11-30 2021-11-16 2021-11-02 2021-10-19 | MC 23.3.21 - Lab. Fis mpfg@ua.pt Manuel Pedro Fernandes Graca PL1 (PL) 2022-01-04 2021-12-22 2021-11-24 2021-11-10 2021-10-27 2021-10-13 | MC 16.2.6 rdias@ua.pt Ricardo Assis Guimarães Dias TP1 (TP) 2022-01-19 2022-01-05 2021-12-15 2021-11-17 2021-11-03 2021-10-20 | | | MC ANF. 12.1.1 rdias@ua.pt Ricardo Assis Guimarães Dias T3 (T) | | MC ANF. 12.1.19 -4263 Paulo Fernando da Costa Antunes TP12 (TP) 2022-01-21 2022-01-07 2021-12-10 2021-12-03 2021-11-19 2021-11-05 2021-10-22 | MC 23.3.21 - Lab. Fis lucilia.santos@ua.pt Lucilia Maria Pessoa Tavares dos Santos PL12 (PL) 2022-01-14 2021-12-17 2021-11-26 2021-11-12 2021-10-29 2021-10-15 | |
| 9:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 10:00 | | | | | | | | | | | | | |
| 10:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 11:00 | | | MC 23.3.21 - Lab. Fis claudel@ua.pt Claude Lucien Joseph Boemare PL11 (PL) 2022-01-11 2021-12-21 2021-11-23 2021-11-09 2021-10-26 2021-10-12 | MC 5.2.53 analuisa.silva@ua.pt Ana Luisa Monteiro da Silva TP11 (TP) 2022-01-18 2021-12-14 2021-12-07 2021-11-30 2021-11-16 2021-11-02 2021-10-19 | MC ANF. 12.2.1 rdias@ua.pt Ricardo Assis Guimarães Dias T1 (T) | MC ANF. 13.1.19 -4263 Paulo Fernando da Costa Antunes T2 (T) | MC 23.3.21 - Lab. Fis mpfg@ua.pt Manuel Pedro Fernandes Graca PL10 (PL) 2022-01-12 2021-12-22 2021-11-24 2021-11-10 2021-10-27 2021-10-13 | MC 23.3.4 analuisa.silva@ua.pt Ana Luisa Monteiro da Silva TP10 (TP) 2022-01-19 2022-01-05 2021-12-15 2021-11-17 2021-11-03 2021-10-20 | MC 23.3.21 - Lab. Fis lebre@ua.pt Filipe Miguel Henriques Lebre Ramos Figueiredo PL3 (PL) 2022-01-13 2021-12-16 2021-11-25 2021-11-11 2021-10-28 2021-10-14 | MC 23.3.14 lebre@ua.pt Filipe Miguel Henriques Lebre Ramos Figueiredo TP3 (TP) 2022-01-20 2022-01-06 2021-12-09 2021-12-02 2021-11-18 2021-11-04 2021-10-21 | MC ANF. 12.1.19 -4263 Paulo Fernando da Costa Antunes TP13 (TP) 2022-01-21 2022-01-07 2021-12-10 2021-12-03 2021-11-19 2021-11-05 2021-10-22 | MC 23.3.21 - Lab. Fis lucilia.santos@ua.pt Lucilia Maria Pessoa Tavares dos Santos PL13 (PL) 2022-01-14 2021-12-17 2021-11-26 2021-11-12 2021-10-29 2021-10-15 | |
| 11:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 12:00 | | | | | | | | | | | | | |
| 12:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 13:00 | | | | | | | | | | | | | |
| 13:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 14:00 | MC 23.3.21 - Lab. Fis lebre@ua.pt Filipe Miguel Henriques Lebre Ramos Figueiredo PL4 (PL) 2022-01-10 2021-12-20 2021-11-22 2021-11-08 2021-10-25 2021-10-18 2021-10-11 | MC 10.1.7 -4263 Paulo Fernando da Costa Antunes TP4 (TP) 2022-01-24 2022-01-17 2022-01-03 2021-12-13 2021-12-06 2021-11-29 2021-11-15 | MC ANF. 11.1.3 rdias@ua.pt Ricardo Assis Guimarães Dias TP8 (TP) 2022-01-18 2022-01-04 2021-12-14 2021-12-07 2021-11-30 2021-11-16 2021-11-02 2021-10-19 | MC 23.3.21 - Lab. Fis claudel@ua.pt Claude Lucien Joseph Boemare PL8 (PL) 2022-01-11 2021-12-21 2021-11-23 2021-11-09 2021-10-26 2021-10-12 | | | | MC 23.3.21 - Lab. Fis lucilia.santos@ua.pt Lucilia Maria Pessoa Tavares dos Santos PL6 (PL) 2022-01-13 2021-12-16 2021-11-25 2021-11-11 2021-10-28 2021-10-14 | MC 23.3.7 analuisa.silva@ua.pt Ana Luisa Monteiro da Silva TP6 (TP) 2022-01-20 2022-01-06 2021-12-09 2021-12-02 2021-11-18 2021-11-04 2021-10-21 | MC 23.3.21 - Lab. Fis lucilia.santos@ua.pt Lucilia Maria Pessoa Tavares dos Santos PL2 (PL) 2022-01-14 2021-12-17 2021-11-26 2021-11-12 2021-10-29 2021-10-15 | MC 16.2.8 -4263 Paulo Fernando da Costa Antunes TP2 (TP) 2022-01-21 2022-01-07 2021-12-10 2021-12-03 2021-11-19 2021-11-05 2021-10-22 | | |
| 14:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 15:00 | | | | | | | | | | | | | |
| 15:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 16:00 | | | MC 23.3.21 - Lab. Fis mpfg@ua.pt Manuel Pedro Fernandes Graca PL5 (PL) 2022-01-11 2021-12-21 2021-11-23 2021-11-09 2021-10-26 2021-10-12 | MC 16.2.7 rdias@ua.pt Ricardo Assis Guimarães Dias TP5 (TP) 2022-01-18 2022-01-04 2021-12-14 2021-12-07 2021-11-30 2021-11-16 2021-11-02 2021-10-19 | | | MC 23.3.21 - Lab. Fis lucilia.santos@ua.pt Lucilia Maria Pessoa Tavares dos Santos PL7 (PL) 2022-01-13 2021-12-16 2021-11-25 2021-11-11 2021-10-28 2021-10-14 | MC 23.3.7 analuisa.silva@ua.pt Ana Luisa Monteiro da Silva TP7 (TP) 2022-01-20 2022-01-06 2021-12-09 2021-12-02 2021-11-18 2021-11-04 2021-10-21 | | | | | |
| 16:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 17:00 | | | | | | | | | | | | | |
| 17:30 | | | | | | | | | | | | | |
| 18:00 | | | | | | | | | | | | | |

| Sigla | Código | Nome |
|-------|--------|-------------------|
| MC | 47169 | Mecânica Clássica |

| Sigla | Tipologia |
|-------|----------------------|
| (PL) | Prática Laboratorial |
| (T) | Teórica |
| (TP) | Teórico-Prática |

Trabalho 1 - Movimento de Projéteis

Objetivos

1. Verificar que o tempo de voo de uma bola lançada horizontalmente não varia quando se varia a velocidade inicial.
2. Verificar que a velocidade horizontal do projétil é constante durante o voo.

Introdução

As equações paramétricas (dependentes do tempo) de um projétil com velocidade inicial \vec{v}_0 que se desloca num plano xy , são dadas por

$$x = x_0 + v_{0x}t \quad (1)$$

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

onde t é o tempo, x_0 e y_0 são as coordenadas da posição inicial do projétil, $v_{0x} = v_0 \cos \theta$, $v_{0y} = v_0 \sin \theta$, θ é o ângulo de lançamento relativamente ao eixo dos xx , e g é a aceleração da gravidade. Esta expressão pode ser simplificada fazendo as coordenadas iniciais iguais a zero ($x_0 = 0$, $y_0 = 0$).

Eliminando a variável t das equações (1) e (2) obtém-se a equação da trajetória $y = f(x)$, dada por

$$y = x \tan \theta - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} x^2. \quad (3)$$

A trajetória do projétil é uma parábola (Figura 1) cuja forma depende da velocidade inicial e do ângulo de lançamento. Considerando que o projétil alcança o solo quando $y = -h$, a partir da Equação 2 obtém-se o tempo de voo T :

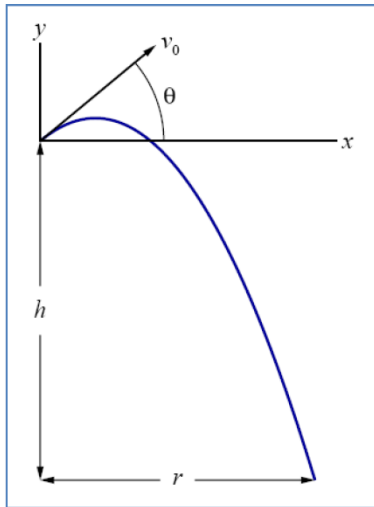


Figura 1

$$T = \frac{v_{0y}}{g} + \sqrt{\left(\frac{v_{0y}}{g}\right)^2 + \frac{2h}{g}}. \quad (4)$$

Quando o projétil é lançado na horizontal, isto é $v_{0y} = 0$, esta expressão reduz-se a

$$T = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (5)$$

Sabendo o tempo de voo e a velocidade inicial podemos determinar através da Equação 1 o alcance do projétil, $x = r$:

$$r = T v_0 \cos \theta. \quad (6)$$

Material fornecido

- Lançador de projéteis (LP) com fio de prumo
- Equipamento PASCO (interface 500, célula fotoelétrica e sensor de tempo de voo)
- Projétil (esfera plástica)
- Alvo
- Fita métrica

A experiência

1. Fixe o LP a mesa com o grampo fornecido (Figura 2).
2. Verifique que a célula fotoelétrica (que vai medir o tempo de passagem do projétil) está junto à saída do lançador.
3. Ligue a célula fotoelétrica à entrada 1 e o sensor de tempo de voo à entrada 2 da interface.
4. Comece por ligar a interface e depois abra no computador o ficheiro executável,

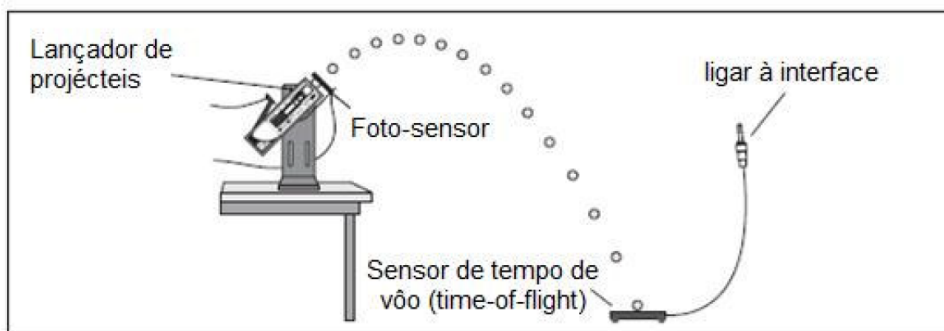


Figura 2

aparecendo-lhe uma tabela onde irão ser registados o tempo de passagem e o tempo de voo.

Parte I - Tempo de voo de uma bola lançada horizontalmente

Na primeira parte desta experiência vai verificar que o tempo de voo de uma bola lançada horizontalmente não varia quando se varia a velocidade inicial.

1. Coloque o lançador a 0° .
2. Meça a distância vertical da saída do lançador ao sensor de tempo de voo.
3. Coloque a bola no LP e verifique que esta fica na posição “short range”.
4. Dispare a bola para determinar a posição da placa no chão.
4. Efetue alguns disparos e registe os tempos de voo.
5. Repita os passos 1-4 para o “medium range” e “long range”. Registe os valores medidos numa tabela.

- Coloque agora o LP com um ângulo de 20° e dispare a bola. Repita para as três velocidades iniciais de lançamento e registre os tempos de voo. Compare os resultados com os registrados para 0° .

Parte II - Velocidade horizontal

Para verificar que a componente horizontal da velocidade se mantém constante durante o voo, comece por montar o dispositivo tal como na Figura 3.

- Ajuste o ângulo do lançador para 20° e coloque a bola na posição “long range”.
- Coloque a placa-alvo na vertical em frente ao lançador e a cerca de 0.50 m deste. Meça e registre esta distância.
- Faça disparos de ensaio para acertar a posição vertical da placa.
- Dispare a bola e registre o tempo de voo.
- Mova a placa-alvo para distâncias de $d = 1$ m, 1.5 m e 2 m. Para cada posição registre a distância d e o tempo de voo numa tabela.

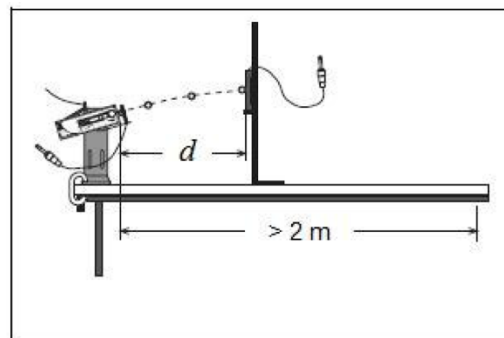


Figura 3

Análise dos resultados

Parte I - Tempo de voo de uma bola lançada horizontalmente

Se o lançador estiver na horizontal os tempos de voo não devem variar significativamente quando se varia a velocidade inicial. Para ângulos diferentes de 0° o tempo varia apreciavelmente com a velocidade inicial.

Utilize os resultados experimentais para o ângulo zero e estime a aceleração da gravidade (considere o valor tabelado $g = 9.81 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Comente os resultados, discutindo entre outros, o erro introduzido por o modelo não ter considerado o atrito do ar, o lançador não estar na horizontal, etc.

Parte II - Velocidade horizontal

Acrescente uma coluna à tabela de dados desta parte e coloque nela os valores estimados da velocidade horizontal. A velocidade é constante? Comente os resultados obtidos.

Trabalho 2 - Viscosidade de um Líquido

Objetivos

1. Estudar a queda de um corpo dentro de um fluido viscoso.
2. Determinar o coeficiente de viscosidade da glicerina utilizando o método de Stokes.

Introdução

Quando um objeto de volume V e massa volúmica ρ é abandonado num fluido de massa volúmica ρ_f , tal que $\rho > \rho_f$, fica sujeita a três forças: o peso, $\rho V g \vec{k}$; a impulsão, $-\rho_f V g \vec{k}$; e a força de atrito, $-b v \vec{k}$, a sendo v a velocidade de queda do objeto. Esta varia com o tempo t segundo

$$v = \frac{F}{b} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right), \quad (1)$$

onde $m = \rho V$ é a massa do corpo e $F = (\rho - \rho_f) V g$. A equação (1) mostra que a velocidade tende para um valor terminal ou limite, $v_L = F/b$, que ocorre quando a resultante das três forças é nula.

No caso de o objeto ser uma esfera de raio $R = D/2$, tem-se que $b = k \eta$, onde $k = 6\pi R$ é chamado coeficiente de forma e η é o coeficiente de viscosidade do fluido. Tem-se então que

$$v_L = \frac{(\rho - \rho_f) g D^2}{18 \eta}. \quad (2)$$

Na figura 1 está ilustrada a equação (1) para o caso de uma esfera de aço de $R = 4 \text{ mm}$ num fluido de glicerina à temperatura de 20°C .

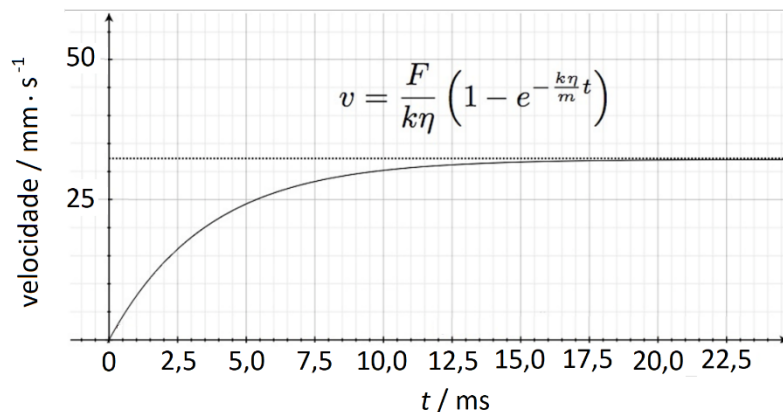


Figura 1 - Representação de uma estimativa teórica da variação da velocidade de queda, dentro da glicerina, de uma esfera de aço de 4mm de diâmetro, em função do tempo ($T_{amb} = 20^\circ\text{C}$).

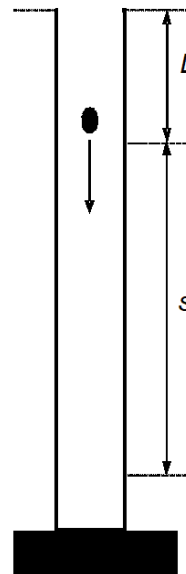
Material fornecido

- Tubo de vidro com glicerina 99.5 % pura, $\rho_{\text{glicerina}} = (1.23 \pm 0.01) \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- Esferas de aço ($\rho_{\text{aço}} = (7.88 \pm 0.01) \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$), com 5 diâmetros (D_i) diferentes: 4.00, 3.50, 3.00, 2.50 e 2.00 mm, todas com $\Delta D_i = 0.01 \text{ mm}$.
- Cronômetros digitais
- Micrómetro
- Fita métrica
- Termômetro digital
- Marcador
- Pinça de plástico
- Produto de limpeza

A experiência



(a)



(b)

Figura 2: (a) montagem experimental e (b) diagrama explicativo

1. Meça a massa de um número, n , razoável de esferas de 4 mm.
2. Limpe as esferas com o produto fornecido e confirme o diâmetro. Deixe cair uma das esferas de maior diâmetro (4 mm) largando-a na zona central do tubo, junto à superfície, mas já no interior do fluido. Estime a partir de que distância L da superfície do fluido se pode considerar que a esfera cai com velocidade constante (ver Figura 2b).

3. Marque no tubo os limites de uma distância s onde a velocidade da esfera é constante. Prepare 5 esferas idênticas e meça para cada uma o tempo t que demora a percorrer o espaço s .
4. Repita o procedimento para as esferas de diferentes diâmetros. Pode diminuir a distância s à medida que usa esferas mais pequenas para que o tempo de queda não se torne demasiado longo.

NOTA: Registe a temperatura da glicerina.

Análise dos resultados

1. Determine a massa volúmica do aço, a partir dos dados obtidos no procedimento 1. Compare o resultado obtido com o valor tabelado.
2. Para cada conjunto de esferas de igual diâmetro D_i , determine o tempo médio que demoram a percorrer o espaço s . (Não determine, para já, o erro $\Delta \bar{t}$.)
3. Calcule a velocidade limite v_L para cada conjunto. (Não determine, para já, o erro Δv_L .)
4. Represente graficamente os pontos experimentais associados à linearização da Eq. (2).
5. Calcule por regressão linear os parâmetros da reta e os respetivos erros.
6. Determine, a partir dos parâmetros da reta, o coeficiente de viscosidade, $\eta \pm \Delta \eta$.
7. Analise a precisão e a exatidão do valor experimental que obteve (ver Figura 3 para os valores tabelados do coeficiente de viscosidade da glicerina a diferentes temperaturas). Explique alguma discrepância que eventualmente surja entre o valor obtido e o valor esperado.
8. Determine os erros $\Delta \bar{t}$ e Δv_L associados respetivamente ao tempo de queda médio e à velocidade-limite.
9. Determine e represente no gráfico linearizado as barras de erro de x e de y . Comente a forma como os erros de v_L se distribuem em função do diâmetro das esferas.
10. Idealize uma experiência, utilizando o mesmo método, que lhe permita minorar os erros experimentais.

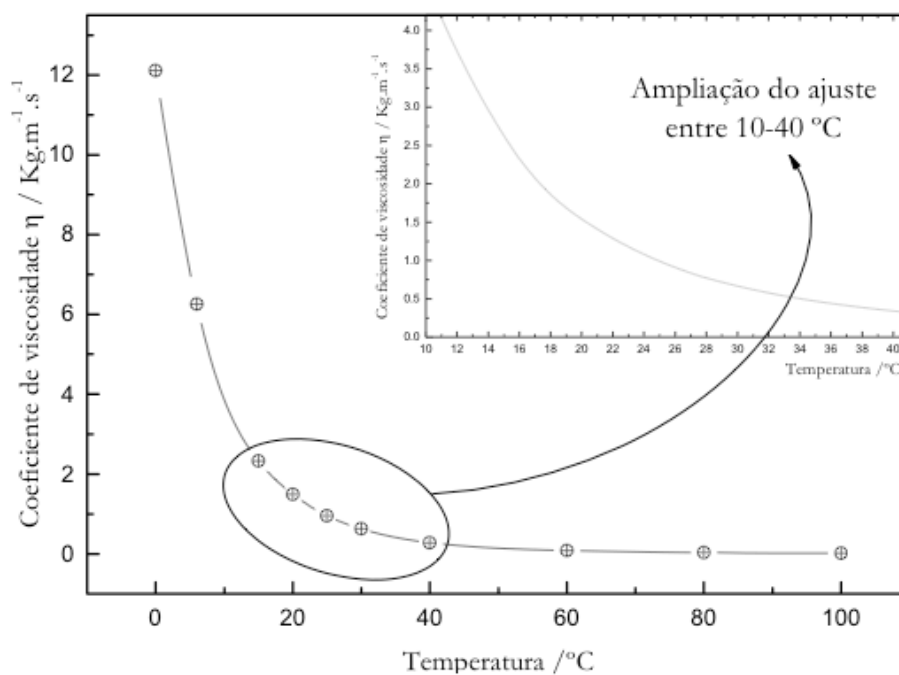


Figura 3 - Variação do coeficiente de viscosidade η da glicerina pura em função da temperatura. Os pontos representam dados experimentais^[3,4] e a linha é um ajuste não-linear que melhor caracteriza esses pontos (obtido pelo método dos MMDQ).

Bibliografia

- [1] Serway, R. A., *Physics for Scientist and Engineers with modern Physics*, 2000, Saunder College Publishing.
- [2] Alonso, M. e Finn, E.J., *Física: um curso universitário*, vol. I, Edgard Blucher, São Paulo, 1972, 487 pp.
- [3] *Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, 1967) 48th ed, pp 1967-1968
- [4] *American Institute of Physics Handbook* (Mc Graw Hill Book Co., New York, 1972) 3rd ed., pp 2-195.

Trabalho 3 - Conservação da energia mecânica

Objetivos

Nesta experiência vai construir um oscilador harmónico amortecido, constituído por uma mola e um carro que desliza numa calha inclinada. Pretende-se investigar experimentalmente o movimento oscilatório amortecido; observar e modelar o efeito das forças de atrito não conservativas; e, estimar o trabalho realizado por estas forças.

Introdução

O movimento do carro que desliza na calha é amortecido pelo atrito, e a amplitude das oscilações diminui no tempo. A força de atrito responsável tem direção contrária ao movimento do corpo e inverte o sentido sempre que o carro inverte o sentido do movimento. Um modelo simples para a força de atrito, que é fisicamente razoável e fácil de tratar matematicamente, é considerar uma força de atrito proporcional à velocidade $-bv$. Nesta forma, a força de atrito tem sempre a direção contrária ao movimento, e muda automaticamente de sentido com o movimento.

Nota: para modelar a fricção do carro na calha, uma força de atrito constante é porventura uma melhor escolha; uma força proporcional à velocidade é mais correta para descrever a resistência do ar ou de um líquido (ver trabalho 3).

Neste modelo, o movimento do carro em função do tempo é dado por:

$$x(t) = x_0 + A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \delta) \quad (1)$$

O coeficiente x_0 é a posição de equilíbrio do carro, quando a componente do peso do carro segundo a direção da calha inclinada cancela a força devido à mola. A amplitude inicial do movimento harmónico amortecido é dada por A . Esta amplitude diminui no tempo devido ao amortecimento, e este está relacionado com α . Num tempo $T = 1/\alpha$ a amplitude decai para $e^{-1} \approx 0.368$ do valor inicial. A frequência angular é ω , que quando o amortecimento é fraco é aproximadamente igual a $\sqrt{k/m}$, em que k é a constante da mola e m a massa do carro. O parâmetro δ corresponde à fase inicial do movimento.

Esta equação para $x(t)$ foi calculada assumindo que a força de atrito é proporcional à velocidade do carro, cuja massa é m . Pode verificar isso mesmo calculando a velocidade e a aceleração:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = -Ae^{-\alpha t}[\alpha \cos(\omega t + \delta) + \omega \sin(\omega t + \delta)]. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{d^2x}{dt^2} \\ &= A e^{-\alpha t}[(\alpha^2 - \omega^2) \cos(\omega t - \delta)] + 2\alpha\omega \sin(\omega t - \delta)] \\ &= -(\alpha^2 + \omega^2) [x(t) - x_0] - 2\alpha v(t). \end{aligned} \quad (3)$$

O primeiro termo da força $F(t) = m a(t)$ é proporcional a $x(t)$, e corresponde à força restauradora da mola. Desta expressão obtemos

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2 = \alpha^2 + \omega^2 \quad (4)$$

A frequência de oscilação ω é diferente da frequência natural da mola ω_0 , mas muito próxima desta se α é pequeno. O segundo termo é proporcional a $v(t)$, e corresponde à força de atrito resistivo, tal que $F_a(t) = -2 m \alpha v(t)$.

Material fornecido

- Plano inclinado (calha metálica);
- Carro deslizando (de massa m);
- Molas;
- Massas;
- Sensor de distância (sonar) e sistema de aquisição de dados (interface 500);
- Programa Capstone;
- Computador com Matlab, com a Curve Fitting Toolbox instalada.

A experiência

Parte I

Medir experimentalmente a constante elástica das molas utilizadas:

1. Suspenda uma mola na vertical. Meça a posição da extremidade livre.
2. Coloque na extremidade livre uma massa conhecida e meça a nova posição de equilíbrio.
3. Repita todo o procedimento para mais 4 massas de valores diferentes.

Parte II

Medir a posição e a velocidade do carro em função do tempo.

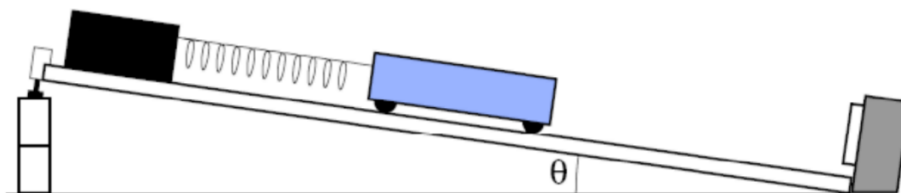





Figura 1

1. Construa o plano inclinado com a calha, e ligue o carro a uma das molas fornecidas conforme mostra a Figura 1. O sensor de distância fica na parte inferior da calha. Verifique que o sistema está estável. Não se esqueça de medir o ângulo.
2. Ligue o sistema de aquisição de dados, e no computador inicie o programa de aquisição de dados Capstone. Configure o sensor de movimento. Crie uma tabela com colunas para o tempo, a posição e a velocidade (para acrescentar colunas, use o ícone  na barra de ferramentas).
3. Com o carro parado, selecione “zerar” (ícone  na paleta de controles) para colocar a zero a posição medida no sensor.
4. Para realizar uma medição, segure o carro numa posição em que a mola está esticada. Tenha cuidado para não deixar o carro atingir o sensor. Largue o carro, e inicie as medidas (ícone  na paleta de controles).
5. Deverá obter um gráfico para a posição em função do tempo semelhante ao da Figura 2, uma curva sinusoidal cuja amplitude diminui no tempo devido às forças de atrito (não-conservativas).
6. Copie os dados referentes ao tempo, posição e velocidade para uma folha Excel.
7. Repita a experiência utilizando outras molas.

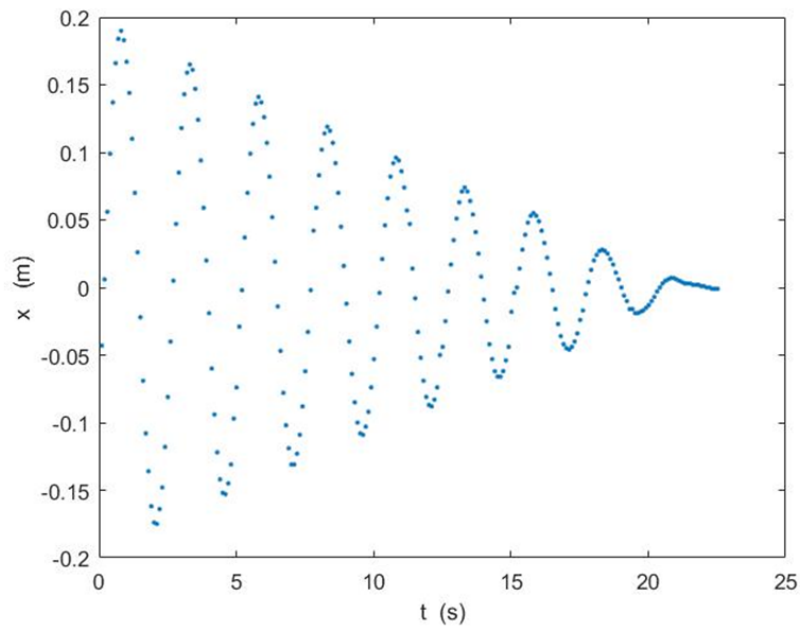


Figura 2

Tratamento e análise dos dados

1. Para cada mola calcule o valor da constante elástica.
2. **Importar dados para o Matlab.** Abra o Matlab. Selecione o ficheiro Excel onde guardou os dados de uma experiência e arraste-o para o Workspace do Matlab. Um menu de importação aparece. Associe as variáveis t , x e v às colunas com o tempo, a posição e velocidade, e no “Output type” escolha “column vectors”. Mande importar. No Workspace devem aparecer três vetores, um para cada uma das variáveis.
3. **Ajustes.** No comando de linha do Matlab escreva “cftool”. Aparece uma nova janela como a da Fig. 3. Na zona 1, na variável independente (X data) escolha t ; na Y data escolha x . Aparece o gráfico dos pontos (t, x) . Agora na zona 2 escolha o tipo de ajuste. Escolha “Custom Equation”, nas duas caixas seguintes escreva x e t , e escreva a função a ajustar (ver eq. 1). Em “Fit Options...” selecione o algoritmo de Levenberg–Marquardt.

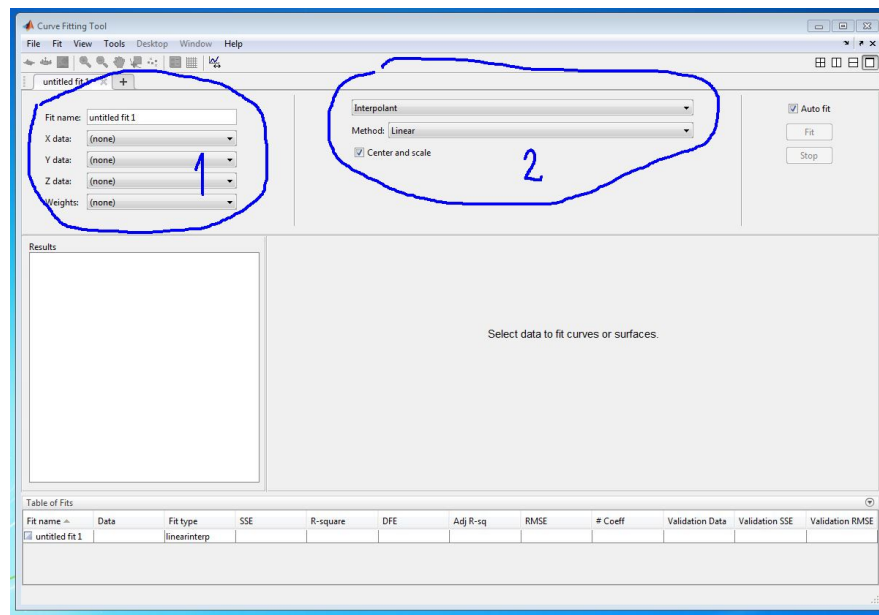


Figura 3

4. O programa procede ao cálculo dos melhores parâmetros do ajuste, que são dados na caixa correspondente, e compara em gráfico a curva obtida com os estes parâmetros com os resultados experimentais. Guarde os valores dos parâmetros e a figura com o ajuste (ver fig. 4).

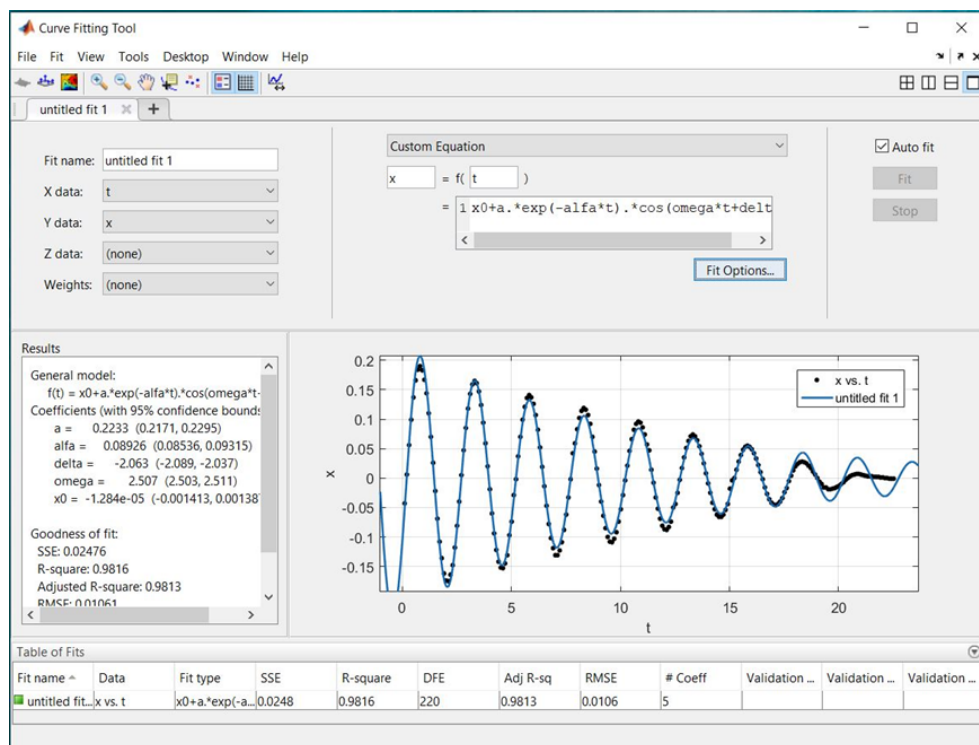


Figura 4

5. Repita o procedimento para as outras molas. Guarde os gráficos da posição do carro em função do tempo e dos ajustes efetuados para cada mola.
6. Discuta se o modelo usado descreve a experiência. Compare os valores obtidos para a frequência angular com a frequência natural do oscilador.
7. **Energia cinética.** Faça um gráfico da energia cinética do carro em função do tempo. A partir deste gráfico estime o trabalho realizado pelas forças de atrito em cada ciclo.
8. **Gráfico $x-v$.** Faça um gráfico da velocidade em função da posição do carro para uma das experiências. Discuta a figura obtida tendo em atenção aquela que obteria se o movimento não fosse amortecido.

NOTA: em alternativa ao Matlab pode analisar os dados com outra aplicação, como por exemplo Origin ou SciDAVis.

Trabalho 4 - Pêndulos acoplados

Objetivos

Determinar os modos normais de oscilação de um sistema de dois pêndulos acoplados.

Observação do fenómeno de batimento.

Introdução

A equação de movimento para um pêndulo composto consistindo num corpo rígido de massa m com um momento de inércia I é:

$$I\vec{\alpha} = \vec{\tau} \quad (1)$$

onde $\vec{\alpha}$ é a aceleração angular e $\vec{\tau}$ é o momento da força resultante que atua sobre o pêndulo.

Quando aplicada a um único pêndulo obtém-se

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -mgc \sin \theta \quad (2)$$

onde c é a distância do eixo de rotação ao centro de massa (como poderá determiná-lo?).

Quando dois pêndulos são acoplados por uma mola (ver Figura 1), o momento da força adicional é dado por

$$\tau_c = dk(d \sin \theta_{1,0} - d \sin \theta_{2,0}) = d^2K(\sin \theta_{1,0} - \sin \theta_{2,0}) \quad (3)$$

sendo k a constante da mola, d é a posição do ponto de suspensão relativamente aos eixos de rotação dos pêndulos, e $\theta_{1,0}$ e $\theta_{2,0}$ são os ângulos iniciais dos dois pêndulos relativamente à vertical.

Assumindo que a distância entre os pontos de suspensão dos pêndulos é igual ao comprimento da mola com elongação nula, então, no equilíbrio, ambos os pêndulos estão na vertical e o momento da força resultante sobre cada um deles é nulo.

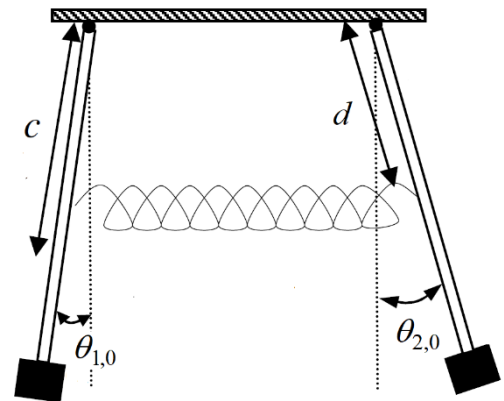


Figura 3

Deslocando os pêndulos das suas posições de equilíbrio, o movimento resultante não será sinusoidal como no caso de um único pêndulo composto. No entanto, é possível obter o

movimento sinusoidal para cada pêndulo em casos particulares. Uma possibilidade, se os pêndulos forem idênticos, é rodar simultaneamente os dois pêndulos de um mesmo ângulo (pequeno!), mantendo constante desta forma a distância horizontal entre eles. Neste caso, a mola não contribui para o momento da força restauradora e os pêndulos oscilam como se fossem independentes. Assim, a frequência angular deste movimento será

$$\omega_+^2 = \frac{mgc}{I} \quad (4)$$

Uma segunda possibilidade é os dois pêndulos terem movimentos exatamente opostos. Neste caso o ponto médio da mola não se move. O movimento de cada pêndulo será então equivalente ao da situação de um único pêndulo ligado lateralmente a uma mola de constante $2k$ (porquê?). A frequência do movimento correspondente é

$$\omega_-^2 = \frac{mgc}{I} + \frac{2d^2k}{I} \quad (5)$$

Estes modos de oscilação em que os pêndulos se movem sinusoidalmente com a mesma frequência designam-se modos normais de oscilação.

Qualquer possibilidade de oscilação é uma combinação linear destes modos normais.

Um caso particular é aquele em que inicialmente um dos pêndulos está na posição de equilíbrio e o outro é posto a oscilar com uma amplitude A_1 . Neste caso, o ângulo descrito por este pêndulo obedece à relação

$$\theta_1(t) = A_1 \cos\left(\frac{\omega_- + \omega_+}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_- - \omega_+}{2} t\right), \quad (6)$$

isto é, observa-se um batimento como se mostra na Figura 2, onde uma oscilação de frequência mais elevada, $\frac{\omega_- + \omega_+}{2}$, está modulada por uma envolvente de frequência muito mais baixa, $\frac{\omega_- - \omega_+}{2}$. Ao dobro da frequência de modulação dá-se o nome de frequência de batimento ω_b , sendo $\omega_b = \omega_- - \omega_+$.

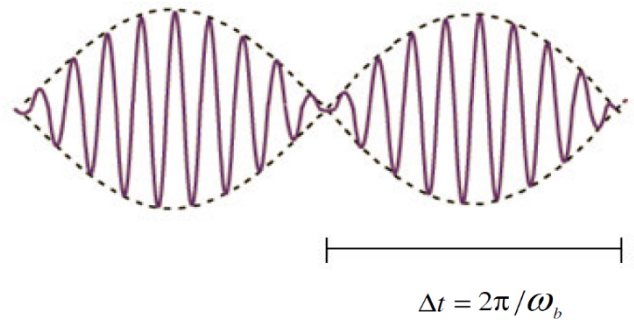


Figura 4

O outro pêndulo oscila de forma análoga, mas desfasada no tempo de tal forma que quando a amplitude de oscilação de um pêndulo diminui a do outro aumenta.

Material fornecido

- 2 pêndulos compostos
- massas
- 1 mola
- sensor e sistema de aquisição de dados
- fita métrica
- Equipamento PASCO (interface 500, sensor de movimento)


A experiência

Coloque a mola à mesma altura nos dois pêndulos. Certifique-se de que as posições das massas nos dois pêndulos são iguais.

Comece por ligar o sensor de movimento e depois abra no computador o ficheiro executável para obter a posição de um dos pêndulos em função do tempo. O sensor deverá ser colocado a cerca de 25 cm de um dos pêndulos em repouso. Oriente o sensor de forma que a placa colocada na extremidade de um dos pêndulos seja detetada.

Parte I - Determinação das frequências

Nesta parte vai ter de medir, para diferentes posições da mola (isto é, para diferentes valores d), o período das oscilações num gráfico do programa PASCO Capstone, medindo o intervalo de tempo entre dois pontos, correspondentes a um determinado número de oscilações. Para isso:

- selecione com o rato, na barra de ferramentas, o ícone  (ferramenta de coordenadas);
- arraste a ferramenta de coordenadas para o primeiro ponto do gráfico;
- com o cursor sobre a ferramenta de coordenadas, carregue na tecla direita do rato e escolha a opção de mostrar “Delta Tool” – aparece um retângulo sombreado;
- arraste até ao segundo ponto o canto do retângulo diametralmente oposto ao do ponto selecionado
- junto ao retângulo aparecem indicadas a variação das abcissas e a variação das ordenadas de um ponto para outro.

Para uma posição da mola (portanto, para um valor de d), determine a:

(i) frequência dos modos normais de oscilação

Coloque os dois pêndulos a oscilar em fase com a mesma amplitude. Verifique que os períodos dos dois pêndulos são iguais e não variam com o tempo. Grave os dados para uma dezena de períodos. Medindo o intervalo de tempo entre dois pontos com a mesma fase, determine o período do movimento.

Coloque agora os dois pêndulos a oscilar com a mesma amplitude, mas em oposição de fase. Proceda como anteriormente para determinar o período.

(ii) frequência do batimento

Coloque um dos pêndulos na posição de equilíbrio e o outro a oscilar. Grave os dados durante o tempo suficiente para observar pelo menos frequências de batimento (Figura 2). Determine ω_b medido o intervalo de tempo como indicado anteriormente.

Repita para mais 5 valores de d .

Parte II - Determinação da constante elástica da mola

Para a análise dos resultados experimentais necessita de determinar:

- (i) o centro de massa, c , dos pêndulos. Para tal tem de retirar um dos pêndulos do suporte horizontal.
- (ii) a constante elástica da mola utilizada. Para isso suspenda a mola na vertical. Meça a posição da extremidade livre. Coloque nesta extremidade livre uma massa conhecida e meça a nova posição de equilíbrio. Repita para mais 4 massas. A partir destes dados calcule a constante da mola $k = mg/\Delta x$.

Análise dos resultados

- (i) A partir da equação 5 e dos valores medidos na Parte I, determine por regressão linear o quociente k/I e ω_+ , **bem como as respetivas incertezas**.
- (ii) Usando o valor de k obtido na Parte II, estime o valor de I .
- (iii) Usando ω_+ obtido em (i), a equação (4) e o valor de c , obtenha outra estimativa de I .
- (iv) Compare as duas estimativas de I .

- (v) Compare o valor de ω_+ determinado em (i) com o obtido graficamente (na Parte I da experiência, oscilações em fase).
- (vi) Compare os valores de ω_b obtidos a partir dos batimentos com os obtidos a partir das frequências das oscilações em fase e em oposição de fase, ω_+ e ω_- , representando graficamente os valores de ω_b em função de d .