



**Sílvia Daniela Ribeiro  
Carvalho**

**Otimização de um piso de ginástica artística**





**Sílvia Daniela Ribeiro  
Carvalho**

**Otimização De Um Piso De Ginástica Artística**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro dos projetos  
UID/EMS/00481/2013-FCT e  
CENTRO-01-0145-FEDER-022083



Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos por todo o apoio prestado ao longo desta dissertação.



## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor adjunto do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, pela disponibilidade e por todos os conhecimentos transmitidos ao longo desta dissertação.

Agradeço ao meu coorientador, o Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa por todo o apoio prestado ao longo desta dissertação.

Agradeço aos meus familiares pela oportunidade, ajuda e motivação ao longo deste percurso.



## **palavras-chave**

Ensaio de impacto por queda livre; Praticáveis de ginástica artística; Máquina de ensaios de impacto por queda livre; Avaliação das propriedades mecânicas de pisos de ginástica artística.

## **resumo**

A presente dissertação teve por objetivo a realização de ensaios de impacto por queda livre em três protótipos de praticáveis de ginástica artística.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica direcionada para os materiais e tecnologias utilizadas no desenvolvimento de equipamento desportivo e da influência que estes equipamentos têm no desempenho e na segurança dos seus utilizadores.

Foi testada uma primeira solução construtiva que serviu de base para comparações com as outras amostras testadas e para a verificação dos modelos físicos considerados.

A 2ª e 3ª série de ensaios foram direcionadas para o estudo da influência da rigidez e flexibilidade do sistema global no desempenho do praticável de ginástica.

Desenvolveram-se um conjunto de programas que facilitaram o processamento e análise dos dados experimentais.

Encontraram-se dois métodos que permitem o cálculo da força máxima de impacto através dos dados de deslocamento medidos pelo *encoder*, um deles é a aplicação da 2ª lei de Newton e outro é a aplicação do teorema energia-trabalho.

As três amostras testadas revelaram deflexão superior à permitida pela norma FIG: IV-MAG1-01.01.2016, contudo, permitiram estabelecer métricas de forma a facilitar o desenvolvimento de novas soluções que se enquadrem nas exigidas pela Federação Internacional de Ginástica (FIG).



**keywords**

Free fall test;Gymnastics floor;Impact test machine;Mechanical properties evaluation.

**abstract**

The present dissertation objective is the accomplishment of impact tests by free fall, in three prototypes of an artistic gymnastics floor.

A bibliographic review was conducted, focusing on materials and technologies used for development of sports equipment. and influence, and these resources on the performance and safety of its users.

The first constructive solution that was tested, served as the basis for comparisons with the other samples tested and for the application of the physical models.

The 2nd and 3rd series of tests were conducted to study the influence of the rigidity and flexibility of the global system on the performance of the gymnastics floor.

A set of programs were developed to help the process of analysis of experimental data.

Two methods were used to calculate the maximum impact force through the displacement data measured by the encoder, one of which is an application of Newton's 2nd law, and the other, an application of the Energy-Work theorem.

The three tested prototypes revealed a deflection superior to the one allowed by the FIG: IV-MAG1-01.01.2016 norm.



## CONTEÚDOS

---

Conteúdos.....	i
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas.....	ix
Lista de símbolos e Abreviaturas .....	xi
CAPÍTULO 1 .....	1
1 Introdução .....	3
1.1 Identificação do problema em estudo.....	3
1.2 Motivação e definição de objetivos para a dissertação .....	3
1.3 Contextualização e enquadramento do trabalho.....	4
1.3.1 Tecnologia aplicada à conceção de equipamento desportivo.....	4
1.3.2 Federação internacional de ginástica.....	7
CAPÍTULO 2.....	11
2 Metodologias de Análise de sistemas mecânicos.....	13
2.1 Cinemática.....	14
2.2 Dinâmica .....	14
2.2.1 Força.....	15
2.2.2 Quantidade de movimento e Impulso.....	15
2.2.2.1 Conservação da quantidade de movimento .....	17
2.3 Energia .....	17
2.3.1 Princípio da conservação de energia .....	17
2.3.2 Energia total de um sistema.....	18
2.3.3 Transferência de energia em sistemas mecânicos .....	18
2.3.4 Energia Mecânica de um sistema .....	19

CAPÍTULO 3 .....	23
3 Desempenho desportivo e desenvolvimento de equipamento de apoio .....	25
3.1 Análise de sistemas: aparelho-ginasta & aparelho-impactor.....	25
3.2 Energia e desempenho dos equipamentos .....	26
3.3 Não linearidade e dissipação de energia.....	29
CAPÍTULO 4.....	33
4 Ensaios de Impacto: Caracterização do comportamento dinâmico .....	35
4.1 Equipamentos e materiais utilizados .....	35
4.1.1 Máquina de ensaio de impacto .....	35
4.1.2 Sistema de aquisição de dados (Hardware & Software) .....	39
4.1.3 Constituição e montagem das amostras testadas .....	42
4.2 Procedimento experimental.....	45
4.2.1 Cálculo da altura de queda .....	45
4.2.2 Calibração dos sensores .....	45
4.2.3 Preparação das amostras.....	45
4.2.4 Procedimento para a realização de ensaios de impacto.....	46
CAPÍTULO 5 .....	47
5 Tratamento e Análise dos dados experimentais .....	49
5.1 1ª Série de Ensaios: ensaios experimentais nas amostras do tipo 1 .....	49
5.1.1 Tratamento e análise dos dados experimentais recolhidos através do encoder.....	52
5.1.2 Resultados obtidos.....	70
5.2 2ª série de ensaios: ensaios experimentais nas amostras do tipo 2.....	71
5.2.1 Resultados obtidos.....	75
5.3 3ª série de ensaios: ensaios experimentais nas amostras do tipo 3.....	75
5.3.1 Resultados obtidos.....	79
CAPÍTULO 6.....	81
6 Conclusões e Trabalhos Futuros .....	83
7 Bibliografia .....	85



ANEXOS.....	87
8 Anexos.....	89
8.1 Análise de dados experimentais: métodos numéricos [13] .....	89
8.1.1 Diferenciação numérica: Método das diferenças finitas .....	89
8.2 Macros utilizadas para o tratamento dos dados experimentais .....	90
8.2.1 Conversão dos dados do NI MAX para Excel.....	93
8.2.2 Seleção da zona de interesse com base nos dados do encoder .....	94
8.2.3 Aplicação do filtro butterworth .....	95
8.2.4 Criação automática de gráficos .....	98
8.2.5 Verificação da viabilidade da aplicação do filtro butterworth .....	99
8.2.6 Obtenção do plano base.....	100
8.2.7 Cálculo da velocidade de impacto/ressalto e da aceleração antes/após o impacto. 104	
8.2.8 Cálculo da força máxima impacto e aceleração média através da célula de carga. 108	
8.2.9 Cálculo da energia cinética, potencial, mecânica e do trabalho .....	112



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1- Piso certificado, modelo “Moskau” da SPIETH®. ....	5
Figura 1.2- (a) Piso ginástica artística; (b) Trampolim de Reuter; (c) Secção de um cavalo de salto; Os materiais e as soluções construtivas apresentadas promovem a absorção e libertação de energia, tendo um efeito de amortecimento durante o aterragem e um efeito mola durante o ressalto. ....	5
Figura 1.3-Factores a considerar no desenvolvimento de aparelhos para ginástica. ....	7
Figura 1.4-Localização dos pontos de teste para cada amostra (Dimensões em mm). ....	10
Figura 2.1 Síntese conceitos físicos importantes no contexto desta dissertação. ....	13
Figura 2.2- Representação de um impulso. ....	16
Figura 2.3-Tipos de sistemas. ....	17
Figura 2.4- Comparação do efeito de forças conservativas (a) e dissipativas (b) na energia mecânica de um sistema [14]. ....	20
Figura 3.1- Deslocamento do centro de massa de um atleta durante um salto de trampolim [2]. ....	26
Figura 3.2- Modelo linear elástico para duas molas com rigidez (k, 2k). ....	27
Figura 3.3-Diagrama força-deformação para um sistema não linear, onde a zona a cinzento corresponde à quantidade de energia. (a) Energia entrada/armazenada ou trabalho realizado pelo atleta (ou impactor) sobre o equipamento; (b) Energia retornada ou trabalho realizado pelo aparelho sobre o atleta (ou impactor); (c) Energia dissipada por uma superfície/aparelho desportivo[2][15]. ....	29
Figura 4.1-Máquina de ensaios de impacto. ....	35
Figura 4.2-Sistema de suporte e guiamento impactor. ....	36
Figura 4.3-Suporte do encoder de fio. ....	36
Figura 4.4-Suporte do sistema de paragem automática do guincho. ....	36
Figura 4.5-Extremidade inferior do impactor. ....	37
Figura 4.6-Extremidade superior do impactor. ....	37
Figura 4.7-Acopolamento do impactor ao guincho elevatório. ....	37
Figura 4.8-Mecanismo de fixação/libertação do impactor. ....	38
Figura 4.9-Sistema de paragem automática do guincho. ....	38
Figura 4.10-Adaptação da parte inferior do impactor. ....	39
Figura 4.11-Encoder de fio. ....	39
Figura 4.12-Esquema de funcionamento de um encoder de fio com potenciómetro [17]. ....	39
Figura 4.13- Placa de aquisição de dados NI9215 da National Instruments®. ....	40
Figura 4.14-Fonte de alimentação. ....	40
Figura 4.15-Modos de operação de uma célula de carga (Compressão/Tração). ....	40

Figura 4.16-Placa de aquisição de dados NI9237 da National Instruments®. ....	41
Figura 4.17- Chassis CompactDAQ da National Instruments® com cartas NI9237 e NI9215. ....	41
Figura 4.18-Ambiente de aquisição e monitorização do NI MAX. ....	41
Figura 4.19-Estrutura da amostra de piso de ginástica artística (tipologia 1): no sentido ascendente encontram-se as molas helicoidais; as placas de madeira inferiores; as placas de madeira superiores; os colchões de espuma polimérica de quatro camadas; alcatifa (vista lateral).....	42
Figura 4.20-Vista de baixo de uma placa de madeira inferior. ....	43
Figura 4.21-Vista frontal das quatro placas de madeira inferiores com bandas de velcro (dimensões 2000 mm × 3000 mm).....	43
Figura 4.22- Quatro tipos de placas de madeira superiores (vista de baixo).....	44
Figura 4.23-Vista superior após montagem das nove placas superiores. ....	44
Figura 4.24-Vista superior após a montagem dos colchões. ....	44
Figura 4.25-Vista superior após a colocação da alcatifa. ....	44
Figura 5.1-Variação da posição ao longo do tempo para o ensaio 4.6 (via encoder de fio). (A) altura de queda; (B) afundamento máximo; (C) ressalto máximo. ....	50
Figura 5.2-Variação da força ao longo do tempo para o ensaio 4.6 (via célula de carga). ....	50
Figura 5.3-Desempenho do filtro butterworth para o ensaio 4.6 na zona de deflexão máxima. ....	53
Figura 5.4-Desempenho do filtro butterworth para o ensaio 4.6 na zona de ressalto máximo. ....	53
Figura 5.5-Variação da velocidade ao longo do tempo, deslocamento e plano base (ensaio 4.6). ..	54
Figura 5.6-Variação da aceleração ao longo do tempo (original e considerando a aceleração média na zona onde o impactor está livre e parado), deslocamento e plano base (ensaio 4.6).....	54
Figura 5.7- Observação detalhada da variação da velocidade, de acordo com a zona. ....	55
Figura 5.8- Observação detalhada da variação da aceleração, de acordo com a zona. ....	55
Figura 5.9-Observação detalhada da variação da velocidade e aceleração ao longo do tempo, de acordo com a zona (ensaio 4.6).....	57
Figura 5.10-Valor médio e intervalo de confiança da aceleração na zona A para os 14 pontos. ....	58
Figura 5.11-Valor médio e intervalo de confiança da aceleração na zona D para os 14 pontos. ....	58
Figura 5.12-Valor médio e intervalo de confiança da velocidade de impacto para os 14 pontos. ...	59
Figura 5.13-Valor médio e intervalo de confiança da velocidade de ressalto para os 14 pontos.....	59
Figura 5.14-O esquema pretende representar as forças que atuam no impactor durante o impacto. 61	
Figura 5.15-Valor médio da força de impacto e intervalo de confiança; medida pela célula de carga; calculada através dos dados do encoder, por dois métodos distintos, o primeiro através da 2ª lei de Newton e o segundo a partir da variação da energia mecânica do sistema. ....	61
Figura 5.16-Gráfico velocidade-posição. ....	63
Figura 5.17-Trabalho realizado pela força de impacto durante o impacto (ensaio 4.6). ....	63

Figura 5.18-Variação da energia mecânica ao longo do ensaio 4.6. ....	65
Figura 5.19-Variação da energia cinética ao longo do ensaio 4.6.....	66
Figura 5.20-Energia cinética dissipada média (calculada com expressão (5.9) e (5.10) ) e intervalo de confiança para cada ponto testado. ....	67
Figura 5.21-Altura de ressalto média ,experimental e teórica (2 métodos distintos) e respetivo intervalo de confiança para todos os pontos testados. ....	69
Figura 5.22- Deflexão máxima média e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios. ....	72
Figura 5.23-Ressalto máximo médio e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios.....	73
Figura 5.24- Força máxima de impacto (via encoder) média e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios experimentais. ....	73
Figura 5.25-Força máxima de impacto (célula) média e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios experimentais.....	74
Figura 5.26-Deflexão máxima média e intervalo de confiança para 1ª e 3ª série de ensaios.....	76
Figura 5.27- Ressalto máximo médio e intervalo de confiança para 1ª e 3ª série de ensaios. ....	77
Figura 5.28- Força máxima de impacto (via encoder) média e intervalo de confiança para a 1ª e 3ª série de ensaios experimentais. ....	77
Figura 5.29-Força máxima de impacto (via célula de carga) média e intervalo de confiança para a 1ª e 3ª série de ensaios experimentais. ....	78
Figura 8.1-Ilustração de como o gradiente entre dois pontos se transforma na reta tangente ao ponto se considerarmos a diferença entre os dois pontos a analisar nula. Adaptado de [13]. ....	89
Figura 8.2-Macro “encoder” para o processamento dos dados relativos ao deslocamento (continua na próxima página). ....	91
Figura 8.3-Macro “Conversão” aplicada aos ficheiros Excel obtidos pelo software NI Max.....	93
Figura 8.4-Macro “extremos” para definição do intervalo relevante para estudo.....	94
Figura 8.5-Folha Excel “Originais“ do ficheiro “4.6 encoder.xlsx” . ....	95
Figura 8.6- Visualização da folha Excel “Dados” do ficheiro “4.6 encoder. xlsx”.....	96
Figura 8.7- Macro “limites”, para o cálculo das variáveis enumeradas no programa. ....	97
Figura 8.8-Macro “GraficoDesl” para a geração automática de gráficos (continua na página seguinte). ....	98
Figura 8.9-3ª parte da macro encoder (Figura 8.2) desenvolvida para analisar a zona de deflexão máxima e mínima. ....	99
Figura 8.10-Macro “Media” para o cálculo da média de variáveis, incluindo o plano base (continua na página seguinte).....	100
Figura 8.11-Macro “open_resultados” para o cálculo da cota do plano base. ....	101
Figura 8.12- Ficheiro “4.0 encoder.xls”, folha Excel “Plano0”, valor do plano base. ....	102

Figura 8.13-Macro “resultados” .....	102
Figura 8.14-Folha Excel “Tratamento” para o ficheiro “4.6 encoder.xlsx” .....	104
Figura 8.15-Macro “limites2” .....	105
Figura 8.16-Ficheiro“Resultados.xlsx”, folha Excel “Plano Base” .....	106
Figura 8.17-Macro D-V-A para a criação dos gráficos.....	107
Figura 8.18-Macros “fmax” e “a_media”, a partir das quais se calcula a força máxima de impacto e a aceleração média ao longo do ensaio (via célula carga).....	108
Figura 8.19- Ficheiro “4.6 célula.xlsx”, folha Excel “Força” .....	109
Figura 8.20-Macro “encoder_celula” a partir da qual se reúnem na mesma folha Excel os dados medidos pelo encoder de fio e pela célula de carga. ....	110
Figura 8.21-Macro “limites3”, copia os valores de deslocamento filtrado, velocidade e aceleração para a folha Excel “a_media” .....	111
Figura 8.22-Ficheiro “4.6 encoder.xlsx, ” Folha Excel “a_media”;.....	111
Figura 8.23-Macro “energia” (continua na próxima página). ....	112
Figura 8.24-Folha Excel “a_media”.....	114

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1.1-Evolução dos equipamentos/e patentes para a modalidade solo. Adaptado [6].	6
Tabela 1.2-Requisitos de desempenho (x representa o valor médio)	8
Tabela 2.1-Unidades importantes no contexto desta dissertação.	14
Tabela 2.2-Equações diferenciais cinemáticas [13].	14
Tabela 2.3-Principais formas de energia no contexto deste trabalho.	18
Tabela 3.1-Valores aproximados para a constante elástica (k), deformação máxima ( $\Delta x$ ) e a energia máxima armazenada para diferentes tipologias de equipamento desportivo [2][15].	28
Tabela 3.2-Relação entre os tipos de colisões, a energia cinética e o COR	31
Tabela 4.1-Tabela síntese com os principais componentes de cada série.	43
Tabela 5.1-Tabela de síntese das etapas de processamento dos dados medidos pelo encoder de fio.	52
Tabela 5.2-Tabela síntese com a descrição das zonas de interesse de acordo com o intervalo temporal (ensaio 4.6) e as grandezas com maior relevância para cada zona descrita.	56
Tabela 5.3-Sentido da velocidade e aceleração para cada zona de interesse (Figura 5.9).	57
Tabela 5.4-Coeficiente de restituição cinética médio (COR) para cada um dos pontos ensaiados.	67
Tabela 5.5-Energia cinética retornada e dissipada (%).	68
Tabela 5.6-Tabela síntese com a média e desvio padrão (DP) dos parâmetros medidos para a 1ª série de ensaios, deflexão máxima [mm], ressalto máximo [mm], força máxima de impacto [N].	70
Tabela 5.7-Tabela síntese com a média e desvio padrão (DP) dos parâmetros a medir para a 2ª série de ensaios, deflexão máxima [mm], ressalto máximo [mm], força máxima de impacto [N].	75
Tabela 5.8-Tabela síntese com a média e desvio padrão dos parâmetros a medir para a 3ª série de ensaios, deflexão máxima [mm], ressalto máximo [mm], força máxima de impacto [N].	79
Tabela 8.1-Mínimo e máximo, filtrado e original e respetivo erro associado para o ensaio 4.6....	100





## **LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

---

**FX-** Da designação inglesa “*Floor exercices*”.

**DEM-** Departamento de Engenharia Mecânica.

**UA-** Universidade de Aveiro.

**FIG-** Federação Internacional de Ginástica.

**MAG-** Da designação inglesa “*Man’s artistic gymnastics*”.

**GA-**Ginástica Artística.

**SE-**Superfície Elástica.

**MEI-** Máquina de Ensaio de Impacto.

**Lda.-** Limitada.

**NI Max-** Da designação inglesa “*National Instruments Measurement & Automation Explorer*”.

**COR-** Coeficiente de Restituição Cinética.



---

# *CAPÍTULO 1*

---



# **1 INTRODUÇÃO**

---

## **1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA EM ESTUDO**

A atividade principal da empresa Conbego Unipessoal, Lda. é o fornecimento e instalação de equipamento desportivo, recreação e lazer. A empresa pretende expandir-se num novo segmento de mercado, através da introdução de um novo produto, que é um praticável de ginástica utilizado para a realização de exercícios de solo (abreviatura FX e de designação inglesa “*Floor exercices*”).

A parceria com o departamento de engenharia mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro (UA) surgiu no seguimento da avaliação das propriedades funcionais relacionadas com o impacto e amortecimento (força impacto máxima, deflexão e ressalto máximo) das diferentes soluções construtivas por eles desenvolvidas para este novo produto.

Testaram-se três protótipos diferentes, de forma a estabelecer métricas que permitam desenvolver soluções que se enquadrem nas exigidas pela Federação Internacional de Ginástica (FIG).

Um dos protótipos fornecidos, já tinha sido alvo de estudos anteriores [1], contudo, após a atualização da norma no início de 2016, tornou-se necessário voltar a repetir os ensaios de acordo com as alterações efetuadas.

A utilização deste tipo de equipamentos desportivos influencia o desempenho atlético dos seus utilizadores, pelo que é importante relacionar as grandezas medidas experimentalmente com a capacidade que o equipamento tem de armazenar e retornar energia ao ginasta e perceber as causas que influenciam a dissipação de energia [2].

## **1.2 MOTIVAÇÃO E DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS PARA A DISSERTAÇÃO**

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar as propriedades mecânicas e dinâmicas de diferentes soluções construtivas para pisos de ginástica artística para elementos do sexo masculino, através da realização de ensaios de impacto, segundo as especificações contidas na norma FIG: IV-MAG1-01.01.2016 (páginas 4-7) [3].

Para a realização da componente experimental desta dissertação foi utilizado um banco de ensaios de impacto, por queda livre, inteiramente projetado e fabricado no DEM e que no passado sofreu algumas adaptações para a realização deste tipo de ensaios [4], de acordo com as informações contidas na norma citada anteriormente [3].

Por outro lado, foi necessário avaliar o rigor dos resultados experimentais obtidos, de forma a garantir que as condições do ensaio são respeitadas e que os valores adquiridos correspondem à realidade. Tornou-se, portanto, essencial encontrar modelos físicos e matemáticos que descrevam com rigor o comportamento do sistema, de forma a realizar este tipo de averiguações.

Esta avaliação é benéfica não só no contexto deste trabalho, mas também no decorrer de trabalhos futuros que possam necessitar da utilização do banco de ensaios de impacto, sendo este também um dos propósitos desta dissertação.

### **1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TRABALHO**

O equipamento desportivo é utilizado com o intuito de providenciar proteção, conforto e auxílio ao praticante durante a atividade desportiva. No desporto de competição existem outras necessidades que os equipamentos de apoio devem colmatar e que se relacionam com os aspetos que podem melhorar o desempenho desportivo, portanto, a escolha das soluções construtivas, dos materiais aplicados e das tecnologias utilizadas deve ser efetuada de acordo com esta exigência [2].

#### **1.3.1 Tecnologia aplicada à conceção de equipamento desportivo**

Nas primeiras décadas do séc. XX, a modalidade de FX era praticada ao ar livre, em relvados naturais, terra batida ou em camadas de serradura compactada. Estas superfícies foram gradualmente substituídas por outras criadas pelo Homem, o qual inicialmente utilizou o “*tatami*” (tecido fabricado com palha de arroz de origem Japonesa), seguido de tapetes de tecido preenchidos com algodão e por fim os colchões de espuma sintética (de diversos materiais, formas, densidades) [5].

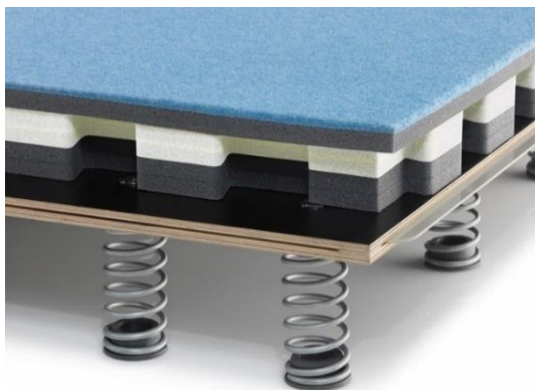


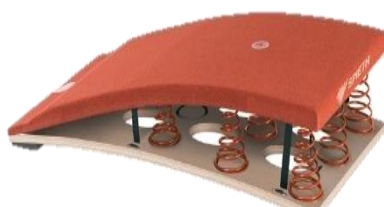
Figura 1.1- Piso certificado, modelo “Moskau” da SPIETH®.

Foi durante a década de 80 que a prática de ginástica artística (GA) sofreu uma alteração mais significativa devido à modificação dos materiais e tecnologias utilizadas no desenvolvimento de equipamentos desportivos, nomeadamente dos pisos para a prática da modalidade de solo, com a introdução dos “spring-floor” (painel de contraplacado para suporte dos conjuntos de molas, espuma polimérica e carpete, Figura 1.1 ) [6].

O uso deste tipo de pisos teve por objetivo o aumento da segurança dos ginastas, através da redução da força de impacto (decorrente do contacto entre o ginasta e o equipamento) sentida pelo sistema musculo-esquelético do atleta, especialmente durante a aterragem (cerca de 10-14 vezes maior que o peso do atleta [6][7]). Assim, as soluções construtivas apresentadas até ao momento, que eram bastante rígidas, foram substituídas por outras fabricadas a partir de materiais e componentes com maior elasticidade (Figura 1.2- espumas poliméricas, molas helicoidais; consultar Tabela 1.1) [6].



(a)



(b)



(c)

Figura 1.2- (a) Piso ginástica artística; (b) Trampolim de Reuter; (c) Secção de um cavalo de salto; Os materiais e as soluções construtivas apresentadas promovem a absorção e libertação de energia, tendo um efeito de amortecimento durante o aterragem e um efeito mola durante o ressalto.

Tabela 1.1-Evolução dos equipamentos/e patentes para a modalidade solo. Adaptado [6].

<b>Título</b>	<b>Patente</b>	<b>Data</b>
<b>Colchão desdobrável para ginástica e atletismo</b> Título original: “ <i>Roll-fold floor mat for gymnastic and athletic purposes</i> ”	US 3636576	1972
<b>Piso elástico para aplicação em ginásios</b> Título original: “ <i>Resilient floor, especially for gymnasiums</i> ”	US 3828503 A	1973
<b>Disposição para pisos de GA</b> Título original: “ <i>Arrangement for Floor Gymnastics/Floor Panel System</i> ”	US 4135755	1977
<b>Estrutura para pisos de GA com elasticidade vertical</b> Título original: “ <i>Gymnastic floor structure having vertical elasticity</i> ”	US 4648592	1985
<b>Pisos do tipo “almofada de ar”</b> Título original: “ <i>Air-cushion floor</i> ”	CN 201099969 Y	2007
<b>Estrutura para pisos de ginástica</b> Título original: “ <i>Gymnastic floor structure</i> ”	US 7849646 B2	2009
<b>Colchão flexível com espuma multicamada</b> Título original: “ <i>Flexible mat with multiple foam layers</i> ”	US 20130017372 A1	2011

A combinação entre os diversos elementos, com maior e menor elasticidade, garante que o equipamento, quando sujeito a esforços externos, deforma, maximizando a absorção da energia gerada durante o impacto.

Por outro lado, são igualmente capazes de armazenar e libertar a energia decorrente da sua deformação, promovendo o aumento da velocidade e da altura do centro de massa do atleta, o que é vantajoso no que diz respeito ao desempenho desportivo [7].

A correcta utilização desta nova geração de equipamentos e superfícies elásticas (SE) promoveu a melhoria do desempenho desportivo, possibilitando aos ginastas uma gestão mais eficiente do *input* energético dispendido na realização de acrobacias, consequência do aumento do tempo disponível para a execução de elementos acrobáticos no ar [8][9].

Importa referir que todos os recordes mundiais em desporto (incluindo a modalidade de FX) foram alcançados após 1980, sendo redefinidos até aos dias de hoje. Naturalmente, este facto acaba por ser um indicativo que as melhorias realizadas ao nível dos equipamentos de apoio tiveram grande influência no desempenho atlético [10].



### 1.3.2 Federação internacional de ginástica

A FIG é responsável por promover a igualdade de oportunidade entre todos os ginastas durante os eventos por ela sancionados. As diretivas estabelecidas por esta entidade têm grande importância em diversas etapas do projeto de desenvolvimento de equipamento desportivo, nomeadamente:

- Na definição dos requisitos do produto, existem um conjunto de especificações, relacionados com a construção e o desempenho que devem ser respeitadas.
- Na validação do equipamento de teste.
- Na correta definição do procedimento experimental.
- No tratamento da informação recolhida.
- Na homologação da solução.

Para as empresas que pretendam certificar os seus produtos, é imposto o cumprimento dos requisitos estabelecidos nas normas em vigor.

De acordo com a informação apresentada até ao momento e com os objetivos que foram definidos para esta dissertação, o esquema da Figura 1.3 pretende sintetizar e integrar os fatores que devem ser tidos em conta para o projeto, conceção, teste e validação de equipamento desportivo.

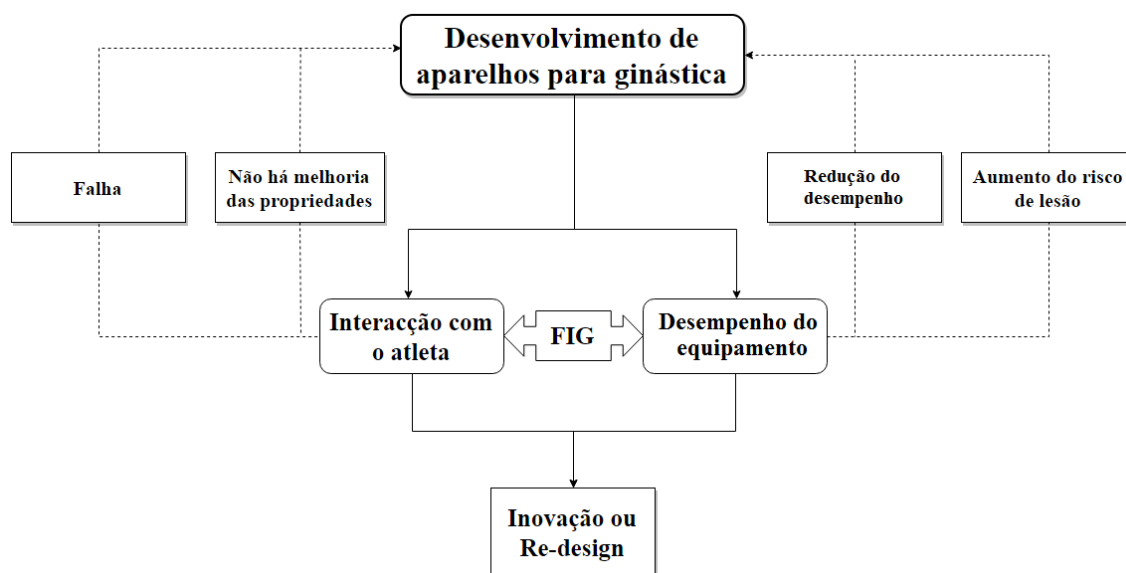


Figura 1.3-Fatores a considerar no desenvolvimento de aparelhos para ginástica.

No que diz respeito aos pisos de ginástica artística masculina para a modalidade de solo, que são o objeto de teste nesta dissertação, as normas que vigoram são a FIG: IV-MAG1-01.01.2016 [3], que diz respeito aos procedimentos de teste e tratamento de dados e a norma FIG: II-MAG1-01.01.2014 [11] que dita regras para a conceção e construção de soluções para pisos de GA.

A principal vantagem da criação deste tipo normas é a redução das diferenças funcionais entre o equipamento de treino e o de competição, desta forma os fabricantes devem respeitar essas diretivas para produzir equipamento desportivo e obter certificação.

A padronização dos pisos de ginástica artística é possível através do controlo das suas propriedades funcionais (norma FIG: IV-MAG1-01.01.2016 [3]), nomeadamente as que se relacionam com o impacto, entre elas o afundamento máximo, altura de ressalto máximo e a força máxima durante o impacto (consultar Tabela 1.2) [3].

O afundamento e o ressalto são grandezas que são medidas em relação a uma referência, que segundo a norma é denominada de plano base e que corresponde à superfície do piso de ginástica [3].

A deflexão é a distância vertical (em mm) medida abaixo do plano base, entre a cota do plano base e a cota onde o deslocamento do impactor é mínimo [3].

A altura de ressalto máximo é a distância vertical (em mm) medida acima do plano base, entre a cota do plano base e a cota onde o deslocamento do impactor é máximo (após o impacto) [3].

A força máxima de impacto, que é a força máxima (em N) medida durante o impacto [3].

Tabela 1.2-Requisitos de desempenho (x representa o valor médio)

Deflexão [mm]	Ressalto [mm]	Força máxima [N]
$x \leq 75$	$245 \leq x \leq 335$	$x \leq 3900$

Relativamente ao equipamento de ensaio utilizado no teste dos protótipos fornecidos, a norma é bastante permissiva, desde que o equipamento seja capaz de aplicar um carregamento dinâmico sobre a amostra a testar a uma determinada velocidade pré-estabelecida. Essa velocidade, denominada de velocidade de impacto, é a velocidade instantânea medida no momento que antecede o impacto, sendo o seu valor numérico  $3,96 \pm 3\%$  m/s [3].

É desejável que o equipamento de ensaio esteja instrumentado de forma a ser possível obter o histórico de deslocamento, velocidade e aceleração ao longo do tempo.

As características do impactor também são definidas nesta norma, requerendo que a sua massa total seja  $20 \pm 0.2$  kg, ter superfície de contacto plana de  $100 \pm 5$  mm de diâmetro e as suas extremidades devem possuir um chanfro de forma a prevenir danos na superfície a ensaiar [3].

Foram realizados 10 impactos para cada um dos 14 pontos exigidos pela norma, perfazendo um total de 140 testes por amostra. Dos 10 ensaios realizados para cada ponto, foram utilizados os últimos 8 pontos para determinar a média de cada variável medida. O valor médio de cada variável, para os 14 pontos foi empregue no cálculo da média global, cujo valor numérico deve ser apresentado com 0 casas decimais (sendo este o valor  $x$  presente na Tabela 1.2). Os três valores obtidos foram posteriormente comparados com a informação contida na Tabela 1.2.

As dimensões de cada amostra a testar são 3 por 2 metros e é neste exemplar que se definem os 14 pontos a impactar, de acordo com a marcação presente na Figura 1.4 [3].

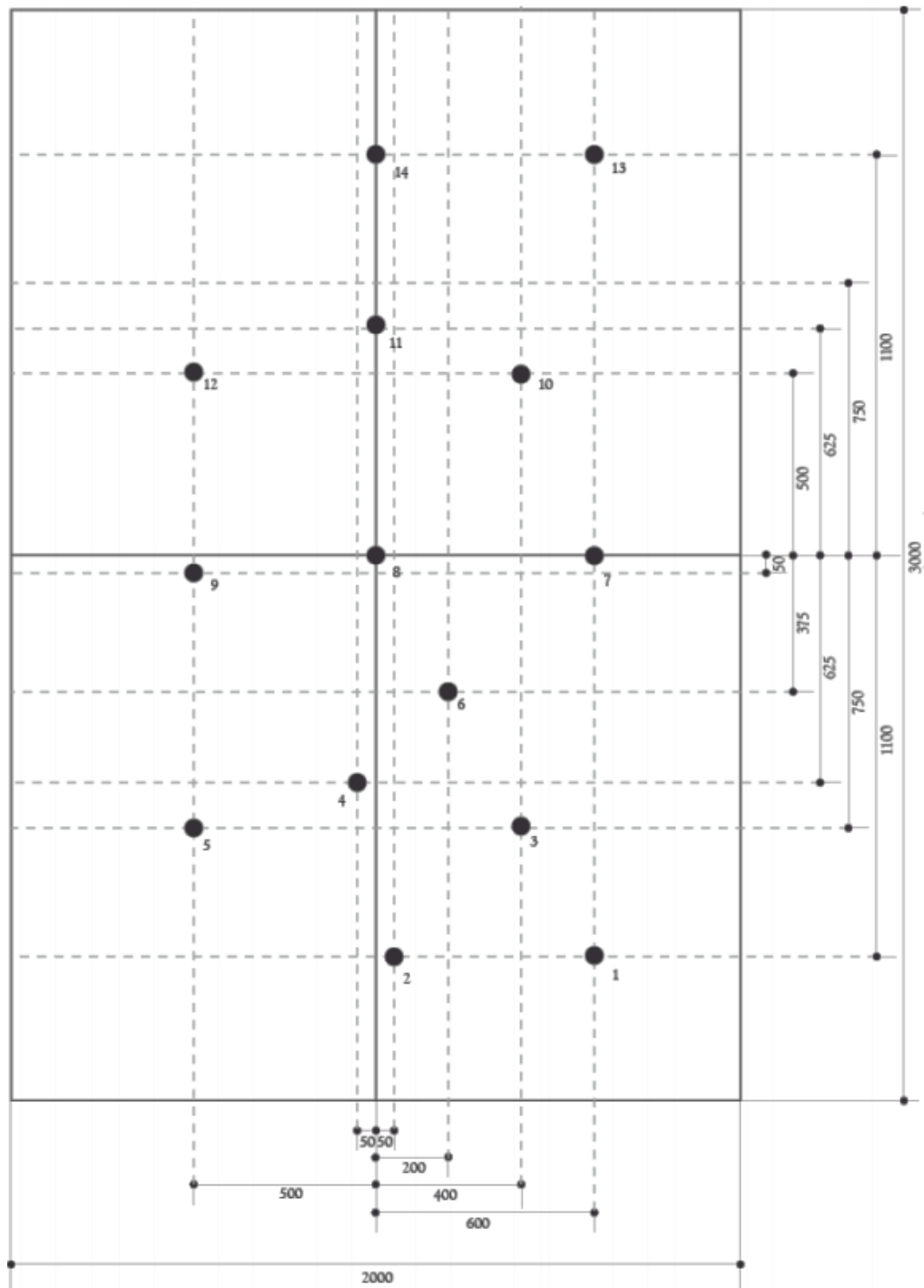


Figura 1.4-Localização dos pontos de teste para cada amostra (Dimensões em mm).

---

# *CAPÍTULO 2*

---



## 2 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE SISTEMAS MECÂNICOS

Os ensaios experimentais realizados no contexto desta dissertação tinham por objetivo o estudo da interação entre o conjunto impactor-protótipo, através da análise de variáveis cinemáticas (deslocamento, velocidade e aceleração) e de uma variável cinética (força máxima de impacto). Trata-se de um sistema dinâmico e, portanto, é necessário avaliar o sistema do ponto de vista causa-efeito.

Analisando a Figura 2.1 verifica-se que a aplicação da segunda lei de Newton não é o único método para a avaliação da interação entre elementos de um sistema. Podem ser utilizadas as leis da conservação para avaliar as mudanças de estado que ocorrem num sistema, através de uma abordagem “antes-depois” da transformação. Uma lei da conservação estabelece que a quantidade total de uma determinada entidade física se mantém constante no sistema, ou seja, é conservada [12].

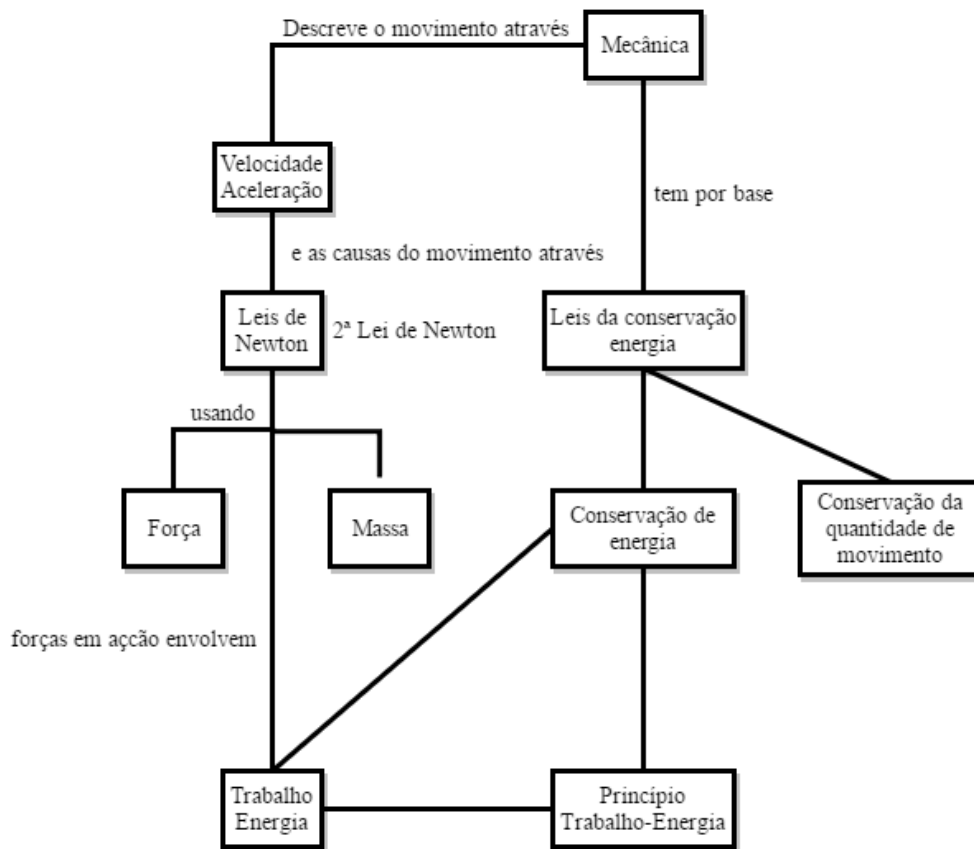


Figura 2.1 Síntese conceitos físicos importantes no contexto desta dissertação.

A Tabela 2.1 apresenta as várias unidades utilizadas nos cálculos relativos às leis indicadas na Figura 2.1.

Tabela 2.1-Unidades importantes no contexto desta dissertação.

<b>Unidades fundamentais</b>	<b>Unidades derivadas</b>		
Tempo (t) [s]	Velocidade (v) [m/s]	Força (F) [N]	Trabalho (W) [J]
Posição (x) [m]	Aceleração (a) [m/s <sup>2</sup> ]	Impulso (I) [N.s]	Energia (E) [J]
Massa (m) [kg]	Deslocamento (s, Δx, d) [m]	Quantidade movimento (p) [kg. m/s]	

## 2.1 CINEMÁTICA

Conhecendo a expressão matemática que define o comportamento do sistema, ou a partir de um conjunto de dados experimentais para uma das variáveis cinemáticas, é possível calcular as outras recorrendo às equações presentes na Tabela 2.2 e utilizando os métodos de cálculo descritos na secção 8.

Tabela 2.2-Equações diferenciais cinemáticas [13].

<b>Velocidade instantânea</b>	Derivada do deslocamento, s, em função do tempo, t.	$v = \frac{ds}{dt}$	(2.1)
<b>Aceleração instantânea</b>	Derivada da velocidade, v, em função do tempo, t.	$a = \frac{dv}{dt}$	(2.2)
	Segunda derivada do deslocamento, s, em função do tempo, t.	$a = \frac{d^2s}{dt^2}$	(2.3)
	Derivada da velocidade, v, em função do deslocamento, s.	$a = v \frac{dv}{ds}$	(2.4)

## 2.2 DINÂMICA

As cargas aplicadas aos materiais podem ser classificadas em estáticas ou dinâmicas; se o seu módulo permanece constante ao longo do tempo, trata-se do primeiro caso; se existe uma variação temporal, trata-se do segundo caso.



Os esforços dinâmicos e estáticos não se diferenciam apenas pela duração da carga atuante: um impacto ou colisão é definido por um carregamento não linear, no qual se verifica a aplicação de uma força de grande módulo durante um período de tempo curto.

### 2.2.1 Força

A 2ª lei de *Newton* ou princípio fundamental da dinâmica (2.5) postula que a força resultante que atua sobre um corpo é resultado do produto da sua massa ( $m$ ) pela sua aceleração ( $a$ ); como a massa do corpo é sempre uma grandeza escalar positiva, conclui-se que a força resultante e a aceleração têm sempre a mesma direção e sentido.

$\sum \vec{F} = m\vec{a}$	(2.5)	<b>F</b> -Força resultante [N] <b>m</b> -Massa [kg] <b>a</b> -Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]
---------------------------	-------	--

De acordo com a equação (2.2) a aceleração é a taxa de variação temporal da velocidade, considerando a massa ( $m$ ) constante, ou seja, a 2ª lei de *Newton* pode ser reescrita de acordo com o estabelecido na equação (2.6).

$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$	(2.6)	<b>F</b> -Força resultante [N] <b>m</b> -Massa [kg] <b>v</b> -Velocidade [m/s] <b>t</b> -Tempo [s]
------------------------------------	-------	---

### 2.2.2 Quantidade de movimento e Impulso

A quantidade de movimento é uma grandeza física fundamental para a correta descrição do relacionamento entre dois elementos de um sistema físico. A quantidade de movimento ou momento linear ( $P$ ) é uma grandeza vetorial, com direção e sentido (igual ao da velocidade); o seu módulo é o produto da massa ( $m$ ) com a velocidade ( $v$ ) (equação (2.7)).

$\vec{P} = m\vec{v}$	(2.7)	<b>P</b> -Momento linear [kg.m/s] <b>m</b> -Massa [kg] <b>v</b> -Velocidade [m/s]
----------------------	-------	---

Assim, de acordo com as equações (2.6) e (2.7), a força é a taxa de variação temporal da quantidade de movimento (2.8). Quanto maior a massa ou a velocidade do corpo, maior será a força necessária para reduzir a sua quantidade de movimento (ou pará-lo).

$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}$	(2.8)	<b>F</b> -Força resultante [N] <b>P</b> -Momento linear [kg.m/s] <b>t</b> -Tempo [s]
---------------------------------	-------	--

Ao produto da força (F) com o intervalo temporal ( $\Delta t$ ) dá-se o nome de impulso (I) e o seu valor numérico pode ser calculado aplicando a equação (2.9). A sua representação gráfica é apresentada na Figura 2.2 (área a cor-de-rosa).

$\vec{I} = \vec{F} \times \Delta t$	(2.9)	<b>I</b> -Impulso [N.s] <b>F</b> -Força resultante [N] <b>t</b> -Tempo [s]
-------------------------------------	-------	--

A Figura 2.2 mostra a evolução da força ao longo do tempo no impacto entre dois corpos.

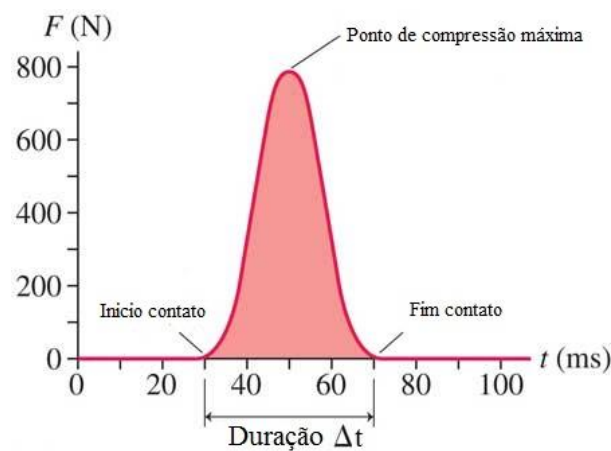


Figura 2.2- Representação de um impulso.

O impulso é igual à variação da quantidade de movimento (2.10). Uma pequena força aplicada durante um período longo produz a mesma variação da quantidade de movimento que uma força grande aplicada durante um período curto.

$\vec{I} = \Delta\vec{P}$	(2.10)	<b>I</b> -Impulso [N.s] <b>P</b> -Momento linear [kg.m/s]
---------------------------	--------	--

### 2.2.2.1 Conservação da quantidade de movimento

Quando dois ou mais corpos interagem, o momento linear desse sistema (conjunto dos corpos) permanece constante (2.11).

$\vec{P}_{inicial} = \vec{P}_{final}$	(2.11)	$\mathbf{P}_{inicial/final}$ -Momento linear [kg.m/s]
---------------------------------------	--------	---

## 2.3 ENERGIA

Além da quantidade de movimento, a energia é uma grandeza física utilizada para descrever a interação entre sistemas físicos.

### 2.3.1 Princípio da conservação de energia

A energia é uma propriedade atribuída a qualquer sistema e é responsável pela capacidade de mudança de estado; sem energia, nenhum processo físico, químico ou biológico seria possível.

O princípio geral da conservação da energia total de um sistema isolado, considera que não existe interação entre o sistema e o exterior, Figura 2.3. Assim, a energia total de um sistema físico isolado é uma quantidade que é conservada, independentemente das transformações que ocorram dentro do sistema, pelo que a variação da energia total do sistema é nula (2.12)

$\Delta E_t = 0$	(2.12)	$\Delta E_t$ -Variação da energia total do sistema [J]
------------------	--------	--

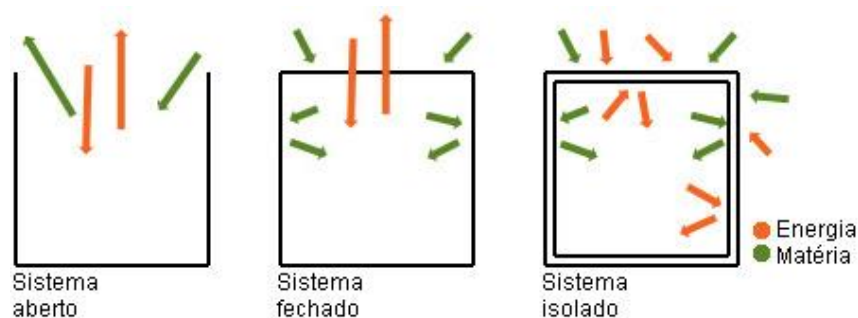


Figura 2.3-Tipos de sistemas.

### 2.3.2 Energia total de um sistema

A energia total de um sistema (2.13) é calculada considerando os três tipos principais de energia. Ao nível macroscópico, temos a energia cinética do sistema e a energia potencial do sistema, ao nível microscópico temos a energia interna do sistema.

$E_t = (E_c + E_p)_{macroscópica} + U$	(2.13)	<b>E<sub>t</sub></b> -Energia total [J] <b>E<sub>c</sub></b> -Energia cinética [J] <b>E<sub>p</sub></b> -Energia potencial [J] <b>U</b> -Energia interna [J]
--	--------	---

O sistema em análise é considerado um sistema mecânico e, desta forma, a contribuição da energia interna para a variação da energia total do sistema é nula.

Na Tabela 2.3 é apresentado o método de cálculo das principais formas de energia utilizadas no contexto deste trabalho.

Tabela 2.3-Principais formas de energia no contexto deste trabalho.

<b>Energia cinética</b>	$E_c = \frac{1}{2}mv^2$	(2.14)	<b>m</b> -Massa corpo [kg] <b>v</b> -Velocidade [m/s]
<b>Energia potencial gravítica</b>	$(E_p)_{gravítica} = m \times g \times h$	(2.15)	<b>g</b> -Constante gravítica [m/s <sup>2</sup> ] <b>m</b> -Massa corpo [kg] <b>h</b> -Altura [m]
<b>Energia potencial elástica</b>	$(E_p)_{elástica} = \frac{1}{2}k\Delta x^2$	(2.16)	<b>k</b> -Constante elástica [N/m] <b>Δx</b> -Deslocamento [m]

### 2.3.3 Transferência de energia em sistemas mecânicos

A energia aparece sob diversas formas, mas a sua definição básica recorre à noção de trabalho. Realiza-se trabalho quando uma força move um corpo ao longo de uma certa distância. Importa salientar que apenas a componente da força (F) com a mesma direção do deslocamento (d) é utilizada para o cálculo do trabalho.

O valor do trabalho realizado por uma força constante é igual ao produto da intensidade da força  $F$  pela distância percorrida  $d$  e pelo cosseno do ângulo ( $\alpha$ ), formado pela direção do deslocamento com a direção da força aplicada (2.17).

$W = F \times d \times \cos \alpha$	(2.17)	<b>W</b> -Trabalho [J] <b>F</b> -Força [N] <b>d</b> -deslocamento [m] <b><math>\alpha</math></b> -ângulo [graus]
-------------------------------------	--------	---

O trabalho realizado por uma força pode ser classificado em motor ou potente, nulo e resistente. Se a força e o deslocamento tiverem a mesma direção e sentido, a energia do centro de massa do sistema aumenta, o trabalho é motor ou potente ( $W > 0$ ). Se a força e o deslocamento forem perpendiculares, a energia do centro de massa não se altera, o trabalho realizado é nulo ( $W = 0$ ). Se a força e o deslocamento tiverem a mesma direção e sentidos opostos, a energia do centro de massa diminui, o trabalho é resistente ( $W < 0$ ).

#### Teorema da energia cinética ou Lei do trabalho-energia

A energia é a capacidade de produzir trabalho. Quando se realiza trabalho sobre um corpo, é-lhe fornecida energia. Energia e trabalho são, de facto, conceitos equivalentes. De acordo com a equação (2.18), o trabalho realizado pela resultante de todas as forças aplicadas no sistema é igual à variação da energia cinética.

$W_{fr} = \Delta E_c$	(2.18)	<b>W<sub>fr</sub></b> -Trabalho da força resultante [J] <b><math>\Delta E_c</math></b> -Variação da energia cinética [J]
-----------------------	--------	---

#### 2.3.4 Energia Mecânica de um sistema

A energia mecânica de um sistema corresponde ao somatório da sua energia potencial e cinética (2.19). De forma semelhante, a variação da energia mecânica de um sistema é a variação da energia potencial e cinética (2.20).

$E_m = E_p + E_c$	(2.19)	<b>E<sub>m</sub></b> -Energia mecânica [J] <b>E<sub>p</sub></b> -Energia potencial [J]
$\Delta E_m = \Delta E_p + \Delta E_c$	(2.20)	<b>E<sub>c</sub></b> -Energia cinética [J]

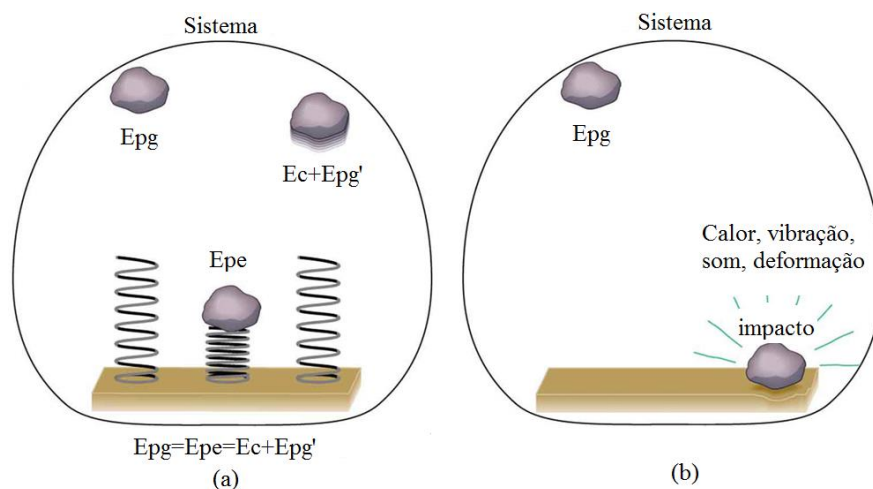


Figura 2.4- Comparação do efeito de forças conservativas (a) e dissipativas (b) na energia mecânica de um sistema [14].

No caso a) representado na Figura 2.4, apenas forças conservativas atuam no sistema. Quando o objeto é largado sobre a mola, a sua energia mecânica mantém-se constante (se a resistência do ar for considerada desprezável), isto porque o peso e a força elástica são forças conservativas.

Quando a mola descomprime, é realizado trabalho sobre o objeto, aumentando a sua energia potencial e cinética, até ao momento em que o objeto retorna ao seu ponto inicial, onde a sua energia é apenas potencial gravítica.

Na situação b) ilustrada na Figura 2.4, o sistema é dissipativo e a energia mecânica não se mantém constante, pois parte da energia é convertida em energia térmica, sonora e em trabalho nas deformações permanentes.

#### Conservação da energia mecânica

Em sistemas onde só atuam forças conservativas, há conservação da energia mecânica, conseqüentemente, a variação da energia mecânica do sistema é nula. A equação (2.20) pode ser simplificada na equação (2.21).

$\Delta E_c = -\Delta E_p$	(2.21)	$\Delta E_c$ -Variação da energia cinética [J] $\Delta E_p$ -Variação da energia potencial [J]
----------------------------	--------	---

Nestas condições, o teorema da energia cinética, equação (2.18), pode ser escrito em função da variação da energia potencial, sendo que o trabalho da força resultante corresponde ao trabalho das forças conservativas aplicadas no sistema, equação (2.22).

$W_{fc} = -\Delta E_p$	(2.22)	<b>W<sub>fc</sub></b> -Trabalho das forças conservativas [J] <b>ΔE<sub>p</sub></b> -Variação da energia potencial [J]
------------------------	--------	--

Forças não conservativas e variação da energia mecânica

Em sistemas dissipativos, o trabalho realizado pela força resultante corresponde ao somatório do trabalho realizado pelas forças conservativas e não conservativas aplicadas no sistema, pelo que o teorema da energia cinética (2.18) para este tipo de sistemas é apresentado na equação (2.23).

$W_{fr} = W_{fc} + W_{fnc} = \Delta E_c$	(2.23)	<b>W<sub>fr</sub></b> - Trabalho da força resultante [J] <b>W<sub>fc</sub></b> -Trabalho das forças conservativas [J] <b>W<sub>fnc</sub></b> -Trabalho das forças não conservativas [J] <b>ΔE<sub>c</sub></b> -Variação da energia cinética [J]
--	--------	--

Pela definição de energia potencial (2.22) e substituindo na equação anterior (2.23) verifica-se que a variação da energia mecânica do sistema é igual ao trabalho das forças não conservativas aplicadas ao sistema (2.24).

$W_{fnc} = \Delta E_p + \Delta E_c = \Delta E_m$	(2.24)	<b>W<sub>fnc</sub></b> -Trabalho das forças não conservativas [J] <b>E<sub>c</sub></b> -Energia cinética [J] <b>E<sub>p</sub></b> -Energia potencial [J] <b>E<sub>c</sub></b> -Energia mecânica [J]
--	--------	--

Quando existem forças não conservativas a realizar trabalho no sistema, a energia mecânica não se mantém constante.





---

# *CAPÍTULO 3*

---



### **3 DESEMPENHO DESPORTIVO E DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE APOIO**

---

No que diz respeito ao desenvolvimento de equipamento desportivo, é necessário aferir a influência que esse equipamento pode ter no desempenho atlético. Este capítulo concentra-se nesse aspeto, melhorar a desempenho desportivo através do uso de equipamento de apoio; para isso é indispensável compreender como é que equipamento desportivo é capaz de armazenar e retornar energia ao atleta e entender os processos de dissipação de energia que ocorrem no sistema durante a atividade física [2].

Quanto à literatura disponível, esta foca-se essencialmente no estudo da interação do sistema ginasta-aparelho e do elemento aparelho isoladamente (nomeadamente no comportamento de superfícies elásticas aplicadas no desenvolvimento de equipamento desportivo [2] [15]). Contudo, parte das principais conclusões podem ser extrapoladas no sentido de avaliar o comportamento do sistema aparelho-impactor.

É importante ressaltar, contudo, que o elemento ginasta é de longe mais complexo do que o elemento impactor. A existência de normas e diretivas torna-se especialmente útil para colmatar esta diferença, pois permite a realização da avaliação do sistema aparelho-impactor isoladamente.

#### **3.1 ANÁLISE DE SISTEMAS: APARELHO-GINASTA & APARELHO-IMPACTOR**

O ginasta despende energia (decorrente do esforço muscular) quando contacta com o aparelho de suporte. Essa energia é transferida na direção do aparelho e é armazenada sob a forma de energia potencial elástica. Após o impacto, quando o contacto entre os elementos do sistema cessa, parte da energia proveniente da deformação do aparelho é transferida na direção do atleta, provocando a alteração da sua energia potencial e cinética, garantindo que o atleta tem a velocidade e a altura necessária para a realização das acrobacias de forma segura. Se o atleta realizar a mesma quantidade de trabalho, o seu desempenho será melhorado se o equipamento de apoio for capaz de retornar energia ao atleta [15].

O salto no trampolim é um ótimo exemplo para descrever o fenómeno apresentado anteriormente: a energia que o trampolim retorna ao atleta permite-lhe atingir a sua altura original com menor esforço (trabalho), comparativamente ao salto sobre uma superfície rígida.

Por outro lado, considerando o trabalho realizado pelo atleta para atingir uma determinada cota numa superfície rígida, essa mesma quantidade de energia aplicada numa superfície deformável levaria a um aumento da altura atingida pelo atleta, consequência da energia de deformação do trampolim (consultar Figura 3.1). Embora a diferentes escalas, cada tipo de equipamento desportivo é capaz de armazenar e retornar energia ao desportista [2][15].

A Figura 3.1 representa o deslocamento vertical do centro de massa do atleta durante um salto de trampolim. A linha mais espessa representa o trajeto do centro de massa se o atleta não realizar nenhum trabalho adicional durante o contato com o trampolim. A diferença entre a altura inicial ( $H_0$ ) e a altura final é  $\Delta 1$  e é o resultado da energia dissipada pelo trampolim. A linha fina representa o trajeto do centro de massa do atleta se este realizar trabalho adicional sobre o trampolim. A altura adicional,  $\Delta 2$ , é resultado do trabalho adicional realizado [2].

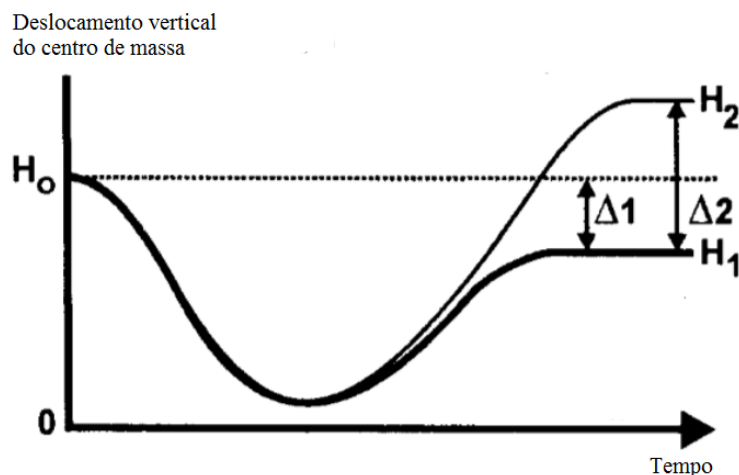


Figura 3.1- Deslocamento do centro de massa de um atleta durante um salto de trampolim [2].

### 3.2 ENERGIA E DESEMPENHO DOS EQUIPAMENTOS

No capítulo anterior, foram abordados alguns conceitos físicos importantes no contexto deste trabalho. Neste capítulo, fez-se a ligação entre esses tópicos e a investigação relacionada com o desenvolvimento de equipamento desportivo. O foco é entender que fatores devem ser tidos em conta na conceção e otimização de aparelhos de suporte à prática desportiva, entre eles os pisos de GA.

O equipamento que é fabricado de acordo com estes requisitos é construído de forma a maximizar a transferência de energia entre o atleta e o equipamento e, portanto, tem influência no desempenho atlético [2] [15].

Ao contactar com o aparelho o atleta realiza trabalho sobre o mesmo. O trabalho realizado é transferido para o equipamento, conseqüentemente, o aparelho deforma; essa deformação é função da força que o ginasta/impactor exerce sobre a superfície durante o contacto; quanto maior a força, maior é a energia armazenada na superfície (3.1) [15].

$W_{atleta/impactor} = \int \vec{F} \cdot d\vec{x} = \Delta E_{equipamento} \quad (3.1)$	<p><b>W<sub>atleta/impactor</sub></b>-Trabalho força impacto [J]  <b>F</b>-Força impacto [N]  <b>dx</b>-Deslocamento [m]  <b>ΔE<sub>equipamento</sub></b>-Energia armazenada pelo equipamento [J]</p>
--	---

A equação anterior (3.1) não é nada mais que uma adaptação da equação (2.24) que relaciona o trabalho realizado por uma força não conservativa com a variação da energia mecânica no sistema. No presente caso, relaciona o trabalho realizado pela força de impacto (que é uma força não conservativa) com a variação da energia mecânica do aparelho.

Uma outra forma de olhar para esta equação (3.1) recorre ao conceito de comportamento linear elástico de uma mola e é o modelo mais simplista para a definição do comportamento de superfícies elásticas e equipamento desportivo, pois não considera a dissipação de energia [2]. A lei de Hooke define matematicamente essa interação.

A partir da lei de Hooke apresentada na equação (3.2), a força elástica é proporcional à deformação, Δx. A constante de proporcionalidade é denominada rigidez (k) e não é nada mais que a capacidade que um corpo tem de resistir à deformação.

Na Figura 3.2 está representado o gráfico força-deformação considerando duas molas com rigidez diferente (k, 2k).

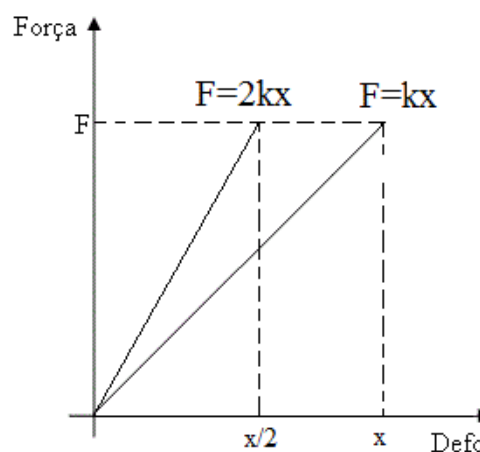


Figura 3.2- Modelo linear elástico para duas molas com rigidez (k, 2k).

$F_{elástica} = k\Delta x \quad (3.2)$	<p><b>F<sub>elástica</sub></b>-Força [N]  <b>k</b>-Rigidez [N/m]  <b>Δx</b>-Deslocamento [m]</p>
--	--

Da análise da Figura 3.2 verifica-se que a área definida por cada um dos triângulos corresponde ao trabalho realizado por uma força elástica (F) ao longo de um deslocamento ( $\Delta x$ ) e, portanto, à capacidade que a mola tem de armazenar energia potencial elástica. O seu valor numérico pode ser calculado de acordo com o estabelecido na expressão (3.3).

$E_{\text{equipamento}} = \frac{1}{2} k \Delta x^2$	(3.3)	<b>k</b> -Rigidez [N/m] $\Delta x$ -Deslocamento [m] <b>E<sub>equipamento</sub></b> -Energia armazenada pelo equipamento [J]
---	-------	--

Assim, a força exercida pelo atleta sobre o equipamento provoca a sua deformação e armazenamento de energia, contudo a magnitude da energia armazenada depende das propriedades da superfície entre elas, a rigidez (k) e a deformação ( $\Delta x$ ) da superfície (3.3).

A energia armazenada pelo equipamento (equação(3.3)) aumenta linearmente com o aumento da rigidez do material, k, e quadraticamente com o aumento da deformação, x. Quanto mais flexível for a superfície, maior a deformação e maior a energia armazenada (consultar Figura 3.2)[2].

Na Tabela 3.1 estão sumarizados os valores máximos de energia armazenada para diferentes superfícies desportivas, assumindo que o material apresenta um comportamento linear elástico.

Tabela 3.1-Valores aproximados para a constante elástica (k), deformação máxima ( $\Delta x$ ) e a energia máxima armazenada para diferentes tipologias de equipamento desportivo [2][15].

<b>Tipologia aparelho</b>	<b>k</b> (N/m)	$\Delta x$ (m)	<b>Energia máxima</b> <b>armazenada<sup>1</sup>, E</b> (J)	<b>Altura</b> <b>adicional<sup>2</sup>, h</b> (m)
Trampolim/ Cama elástica	5000	0.8	1600	2.3
Pista de "tumbling"	50 000	0,1	250	0.36
Praticável ginástica	120 000	0,05	150	0.22
Pista de atletismo	240 000	0,01	12	0.02
Piso de ginásio	400 000	0,005	5	0.01

<sup>1</sup> os valores foram cálculos de acordo com a expressão (3.3) de acordo com o modelo linear elástico; <sup>2</sup> para o cálculo da altura atingida, considerou-se que toda a energia armazenada foi retornada ao atleta e convertida em energia potencial gravítica ( $E=m*g*h$ ), considerou-se uma massa de 70 kg.

De todos os equipamentos apresentados, o trampolim é o que apresenta menor rigidez e uma deformação máxima maior, sendo, portanto, capaz de armazenar grandes quantidades de energia.

### 3.3 NÃO LINEARIDADE E DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

Na seção anterior, apresentou-se um método de análise do sistema atleta-aparelho, assumindo um comportamento linear elástico para quantificar a quantidade de energia armazenada no sistema, pelo que se conclui que toda a energia armazenada era retornada ao atleta.

Contudo, os materiais utilizados no desenvolvimento de equipamento desportivo não apresentam um comportamento linear, ocorrendo frequentemente perdas energéticas relativamente à energia retornada por estes equipamentos. Na Figura 3.3 está apresentado um diagrama força-deformação que demonstra o que foi descrito anteriormente[2].

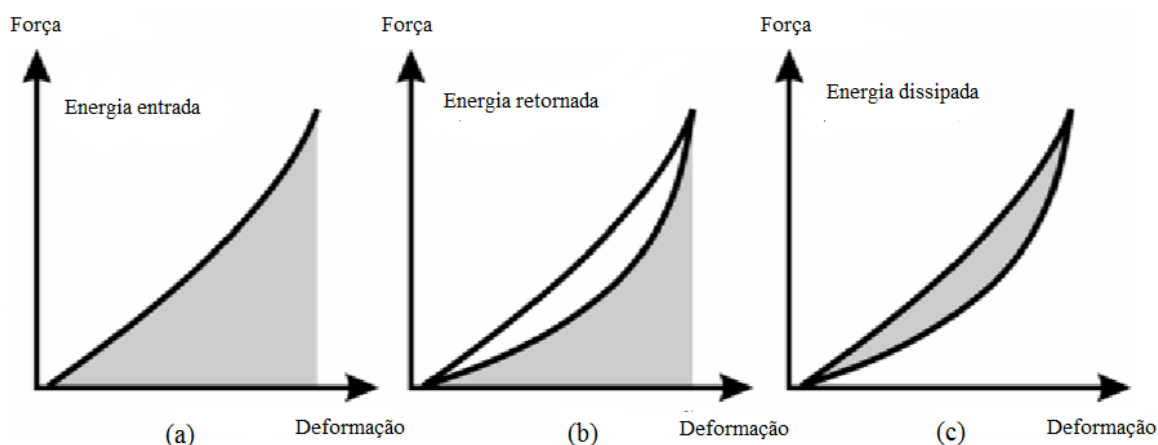


Figura 3.3-Diagrama força-deformação para um sistema não linear, onde a zona a cinzento corresponde à quantidade de energia. (a) Energia entrada/armazenada ou trabalho realizado pelo atleta (ou impactor) sobre o equipamento; (b) Energia retornada ou trabalho realizado pelo aparelho sobre o atleta (ou impactor); (c) Energia dissipada por uma superfície/aparelho desportivo[2][15].

Da observação da Figura 3.3- (b) verifica-se que as curvas de aumento e diminuição da força não são coincidentes (nem existe proporcionalidade entre força-deformação). A este fenómeno chama-se histerese, que não é nada mais que a tendência que um sistema ou material possui em conservar as propriedades anteriores na ausência de um “estímulo”. Neste caso, parte da energia decorrente da deformação permanece na superfície devido às propriedades dos materiais utilizados, que dependem do tempo [2][15][16].

Assim, ao retornar à sua forma original, o trabalho realizado pelo equipamento sobre atleta (ou impactor) é inferior ao trabalho realizado inicialmente pelo atleta (ou impactor). Consequentemente, o equipamento de apoio apenas é capaz de retornar uma percentagem da energia de entrada ao atleta [2].

De acordo com o que foi descrito até ao momento, é possível calcular a magnitude da energia retornada por uma superfície desportiva, sabendo que esta é função do *input* energético aplicado na superfície, retirada a energia dissipada por esta (3.4) [15] .

$E_{Retorno} = E_{Entrada} - E_{Dissipada}$	(3.4)	<b><math>E_{Entrada/Retorno}</math></b> -Energia antes/após impacto [J] <b><math>E_{Dissipada}</math></b> -Energia dissipada [J]
---	-------	---

A eficiência do equipamento de apoio ( $\eta$ ) pode ser calculada com base no *input* energético retornado e é determinado com base na expressão (3.5). O numerador corresponde à energia que o equipamento retorna ao atleta (ou impactor), enquanto o denominador corresponde à energia decorrente do trabalho realizado pelo atleta sobre o equipamento.

$\eta = \frac{E_{output}}{E_{input}}$	(3.5)	<b><math>E_{output/input}</math></b> -Energia antes/após impacto [J] <b><math>\eta</math></b> -Eficiência
---------------------------------------	-------	--

A eficiência de um determinado equipamento de apoio pode variar entre 0 e 1. Uma eficiência 0 indica que o material não retorna nenhuma parte da energia de entrada, enquanto que uma eficiência de 1 indica que toda a energia armazenada no equipamento é retornada ao atleta (comportamento perfeitamente elástico).

A dissipação de energia é uma propriedade inerente aos materiais utilizados na construção destes aparelhos, pelo que pode ser manipulada, mas nunca eliminada. Na realidade, certas superfícies elásticas tiram partido dessa dissipação de forma a absorver as forças de impacto geradas durante a atividade desportiva [15].

Uma forma de quantificar a energia dissipada é através do cálculo da energia cinética dissipada, que se relaciona com o coeficiente de restituição cinética (COR) e é definido como o rácio entre as velocidades relativas dos elementos envolvidos na colisão, depois e antes do impacto [2]. O COR pode ser calculado através da expressão (3.6).



Se considerarmos um corpo A que cai de uma altura  $a_i$  e após o impacto com o corpo B atinge uma cota  $a_f$ , o COR é dado pela expressão (3.7). A aplicação desta expressão é extremamente vantajosa no cálculo da altura teórica de ressalto,  $a_f$  permitindo comparar este valor com o obtido experimentalmente.

$COR = \left  \frac{v_f}{v_i} \right  = \sqrt{\frac{Ec_f}{Ec_i}} = \sqrt{1 - \frac{Ec_d}{Ec_i}} \quad (3.6)$	<p><b>COR</b>- Coeficiente de restituição cinética  <math>v_i/v_f</math>- Velocidade inicial/final impacto [m/s]  <math>E_{ci}/E_{cf}/E_{cd}</math>- Energia cinética inicial/final/dissipada [J]  <math>a_i/a_f</math>- Altura queda/altura de ressalto [m]</p>
$COR = \sqrt{\frac{a_f}{a_i}} \quad (3.7)$	

Tabela 3.2-Relação entre os tipos de colisões, a energia cinética e o COR

Tipo de colisão	Energia cinética	COR
Elástica	Completamente conservada	1
Parcialmente elástica	Parcialmente conservada	$0 < COR < 1$
Inelástica	Dissipação máxima	0

Essa energia pode ser convertida noutros tipos de energia, como calor, vibrações, tudo aspetos que não beneficiam a desempenho atlético.

Embora a energia seja um escalar, a força que é exercida sob o atleta durante o retorno de energia por parte do equipamento de apoio, é uma grandeza vetorial com magnitude, direção e sentido. Para maximizar a quantidade de energia que é retornada ao atleta, a força que é exercida pelo equipamento sob este deve ser aplicada na localização correta e no *timing* adequado [2] [15].

A bibliografia consultada [2][15] indica que apesar de variar consoante a modalidade, na prática de FX, a localização indicada para o retorno de energia por parte do equipamento de apoio corresponde ao local onde ocorre a deformação máxima.

O instante que proporciona o retorno máximo de energia ao atleta é aproximadamente a metade do tempo total de contacto entre os elementos do sistema; até lá ocorre armazenamento de energia que depois é transferida ao atleta [2][15].



---

# *CAPÍTULO 4*

---



## 4 ENSAIOS DE IMPACTO: CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

---

A caracterização do comportamento e das propriedades dos materiais é realizada normalmente através de ensaios mecânicos. A seleção do método de ensaio e dos equipamentos envolvidos deve ser realizada de acordo com o material que se pretende testar, o tipo de carregamento aplicado sobre a amostra (dinâmico ou estático) e as variáveis que se pretendem medir.

### 4.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Já haviam sido referidos anteriormente alguns dos requisitos gerais relativos às características do equipamento de ensaio e das amostras a testar de acordo com as diretivas em vigor. Nesta secção, pretende-se caracterizar com maior detalhe a máquina de ensaios utilizada para o teste das diferentes soluções propostas, bem como a constituição dos protótipos em si.

#### 4.1.1 Máquina de ensaio de impacto

Na Figura 4.1 encontra-se a máquina de ensaios de impacto (MEI) por queda livre utilizada durante a componente experimental desta dissertação. O equipamento encontra-se no DEM e foi projetado e construído por alunos do mestrado integrado em engenharia mecânica em anos anteriores. Certas características deste equipamento já haviam sido integradas de forma a simplificar a execução deste tipo de ensaios (em pisos de GA). Esses sistemas serão descritos oportunamente. A máquina de ensaios de impacto (Figura 4.1) é constituída por cinco sistemas principais [1], sendo eles a viga de suporte do impactor, o guincho de elevação do impactor, o impactor, o mecanismos de libertação do impactor e o sistema de aquisição de dados.



Figura 4.1-Máquina de ensaios de impacto.



Figura 4.2-Sistema de suporte e guiamento impactor.

A viga de suporte do impactor está encastrada na sua extremidade direita a uma coluna do DEM (Figura 4.1), a outra extremidade encontra-se fixa ao mecanismo responsável pelo suporte e guiamento do impactor (consultar Figura 4.1 e Figura 4.2). O suporte e guiamento do impactor é garantido através da utilização de rolamentos lineares que se encontram dentro das caixas de rolamento representadas na Figura 4.2 (caixas negras). São estes elementos que garantem o alinhamento e o guiamento do corpo central do impactor (o varão de aço representado na Figura 4.2).

Através de uma ligação aparafusada à caixa de rolamento superior, encontra-se o suporte do sistema de medição de posição-tempo (Figura 4.3).

Fixado à caixa de rolamento inferior encontra-se o suporte do sistema de paragem automática, responsável pelo retorno à posição inicial de queda livre do impactor (Figura 4.4).



Figura 4.3-Suporte do *encoder* de fio.

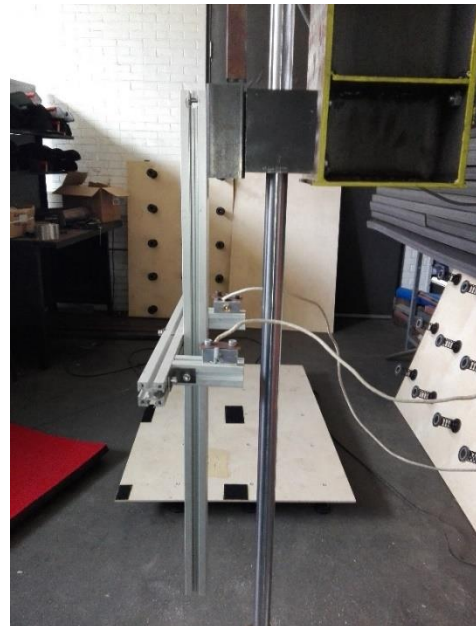


Figura 4.4-Suporte do sistema de paragem automática do guincho.

Na Figura 4.5 está representada a parte inferior do impactor. Observando a figura no sentido ascendente, o impactor é constituído: por um disco de alumínio; é este elemento que entra em contacto com a amostra a testar. Por uma célula de carga; que é o sensor responsável pela medição da força de impacto ao longo do ensaio. Um componente em aço; que é responsável por fixar este conjunto ao varão principal. A massa total de todo o conjunto (impactor) é de  $20 \pm 0,2$  kg. A ligação entre os componentes é realizada através de parafusos.



Figura 4.5-Extremidade inferior do impactor.



Figura 4.6-Extremidade superior do impactor.

Na parte superior do impactor (Figura 4.6), existe um elemento que se encontra fixo ao varão principal do impactor e é responsável pelo acoplamento entre o impactor e o sistema de fixação/libertação do impactor que se encontra no guincho elevatório (Figura 4.7). Este conjunto é responsável pela elevação do impactor à altura de queda desejada.

A chapa de alumínio que se encontra na Figura 4.6 tem como funcionalidade acoplar a extremidade do *encoder* de fio.

Importa referir que as características do impactor respeitam os requisitos presentes na norma FIG: IV- MAG1-01.01.2016 [3].

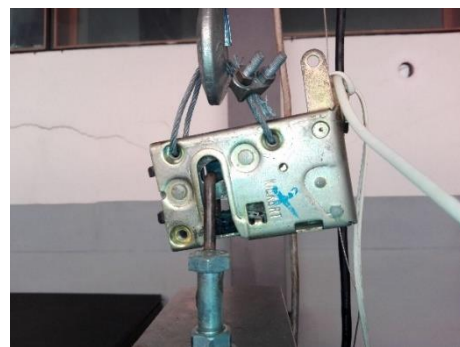


Figura 4.7-Acopolamento do impactor ao guincho elevatório.



Figura 4.8-Mecanismo de fixação/libertação do impactor.

O mecanismo de fixação e libertação do impactor mostra-se na Figura 4.8. Este elemento encontra-se suspenso no guincho de elevação através de um cabo de aço representado na Figura 4.8.

Na Figura 4.7 já havia sido apresentado o modo como todo o conjunto é acoplado (impactor, guincho elevatório e mecanismo fixação/libertação), contudo falta referir o modo de funcionamento deste sistema.

O componente apresentado na Figura 4.8 é uma fechadura de um automóvel, sistema bastante simples e eficaz. O impactor é acoplado ao trinco da fechadura através do gancho presente na extremidade superior do impactor e assim elevado até à altura desejada. A libertação do impactor ocorre quando o operador puxa o fio que se encontra amarrado à patilha representada na Figura 4.8.

Já havia sido referida anteriormente a existência de um sistema responsável pela paragem automática do guincho (Figura 4.9) e, conseqüentemente, do impactor na posição definida pelo operador. Pretende-se agora descrever o seu funcionamento, bem como alguns dos seus principais componentes.

Além de uma estrutura de suporte, o sistema de paragem automática do guincho é constituído por um sensor de posição ótico, composto por um emissor módulo laser verde e um recetor que é um fototransístor.

Enquanto o fototransístor recebe o feixe laser, o motor do guincho funciona normalmente. Quando o feixe laser é interrompido, existe um relé responsável por cortar a corrente ao motor do guincho e, portanto, impede o impactor de ascender.



Figura 4.9-Sistema de paragem automática do guincho.



Para que o feixe laser seja interrompido, a parte inferior do impactor foi equipada com uma chapa de aço quinada a 90°.

Importa referir que em trabalhos anteriores foram realizados testes de forma a verificar a repetibilidade das posições obtidas por este sistema, tendo-se registado uma precisão de  $\pm 0.2$  mm [4].



Figura 4.10-Adaptação da parte inferior do impactor.

#### 4.1.2 Sistema de aquisição de dados (*Hardware & Software*)

No que diz respeito ao *hardware*, o sistema de aquisição de dados é constituído por duas tipologias de transdutores, um responsável pela medição do deslocamento ao longo do tempo e outro responsável pela medição da força ao longo do tempo. Ambos os sensores têm saída em tensão, que depois é convertida em outras grandezas físicas, neste caso distância e força.



Figura 4.11-Encoder de fio.

O funcionamento deste dispositivo está esquematizado na Figura 4.12. O equipamento é montado numa posição fixa (Figura 4.3) e o cabo de aço, fica solidário com o elemento que se move (impactor, Figura 4.6). Desta forma à medida que o movimento ocorre, o fio é distendido ou encurtado.

Para a medição da posição, foi utilizado um *encoder* de fio com potenciómetro (Figura 4.11), com um curso de 1000 mm. No decorrer desta dissertação, existiu a necessidade de utilizar um *encoder* com maior curso, contudo as suas características e funcionamento eram bastante semelhantes ao anterior. Naturalmente, voltou-se a calibrar o sistema de acordo com essa alteração.

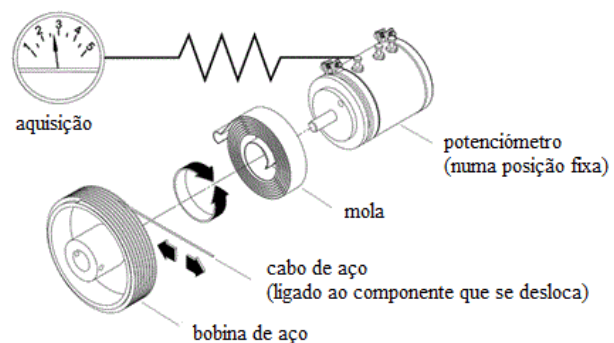


Figura 4.12-Esquema de funcionamento de um *encoder* de fio com potenciómetro [17].

Dentro da estrutura do transdutor, o cabo de aço encontra-se enrolado num carreto cilíndrico de diâmetro constante; esta bobine gira à medida que o cabo de aço se desenrola. A bobine e o eixo do sensor de rotação (potenciômetro) estão conectados através dos seus veios; a distensão do cabo de aço provoca a rotação destes eixos gerando-se um sinal elétrico proporcional a esse deslocamento. Para manter a tensão do cabo existe uma mola acoplada ao carreto cilíndrico [17].

O sinal elétrico é enviado e interpretado pela placa de aquisição de dados NI9215 da *National Instruments*® presente na Figura 4.13. Através do *software* NI MAX da *National Instruments*®, é possível observar o histórico de posição ao longo do tempo. Para garantir o funcionamento do *encoder* de fio é necessário fornecer uma tensão de entrada (tensão de saída dos canais reguláveis 24 VCC), desta forma, faz parte do material utilizado uma fonte de tensão exibida na Figura 4.14.



Figura 4.13- Placa de aquisição de dados NI9215 da *National Instruments*®. Figura 4.14-Fonte de alimentação *Escort* EPS-3250.

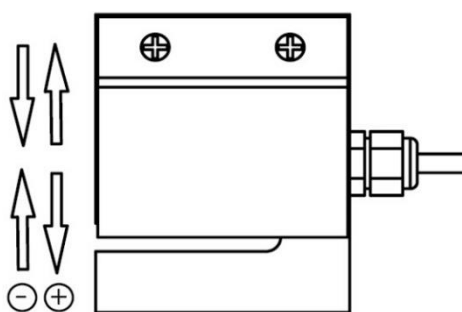


Figura 4.15-Modos de operação de uma célula de carga (Compressão/Tração).

O transdutor de força é uma célula de carga que faz parte da constituição do impactor (Figura 4.5). O seu modo de operação é à compressão (Figura 4.15) e o intervalo de força que pode medir corresponde a 5 kN. É uma célula de carga equipada com extensómetros e a medição de carga é obtida indiretamente através da deformação sentida pelo material acoplado aos extensómetros. Internamente, estas células estão munidas de quatro extensómetros em ponte de *Wheatstone* cuja saída, na gama do microvolt, é depois amplificada e convertida pela placa de aquisição de dados NI9237 da *National Instruments*® (Figura 4.16).

Através do software NI MAX da *National Instruments*® é possível observar o histórico de força ao longo do tempo. Ambas as cartas estão acopladas a um chassis representado na Figura 4.17.



Figura 4.16-Placa de aquisição de dados NI9237      Figura 4.17- Chassis CompactDAQ da *National Instruments*® com cartas NI9237 e NI9215.

O software NI MAX (*National Instruments-Measurement & Automation Explorer*) utilizado nesta dissertação permite integrar a informação recolhida por ambos os sensores (a curva a azul e vermelho são, respetivamente, a posição-tempo e força-tempo).

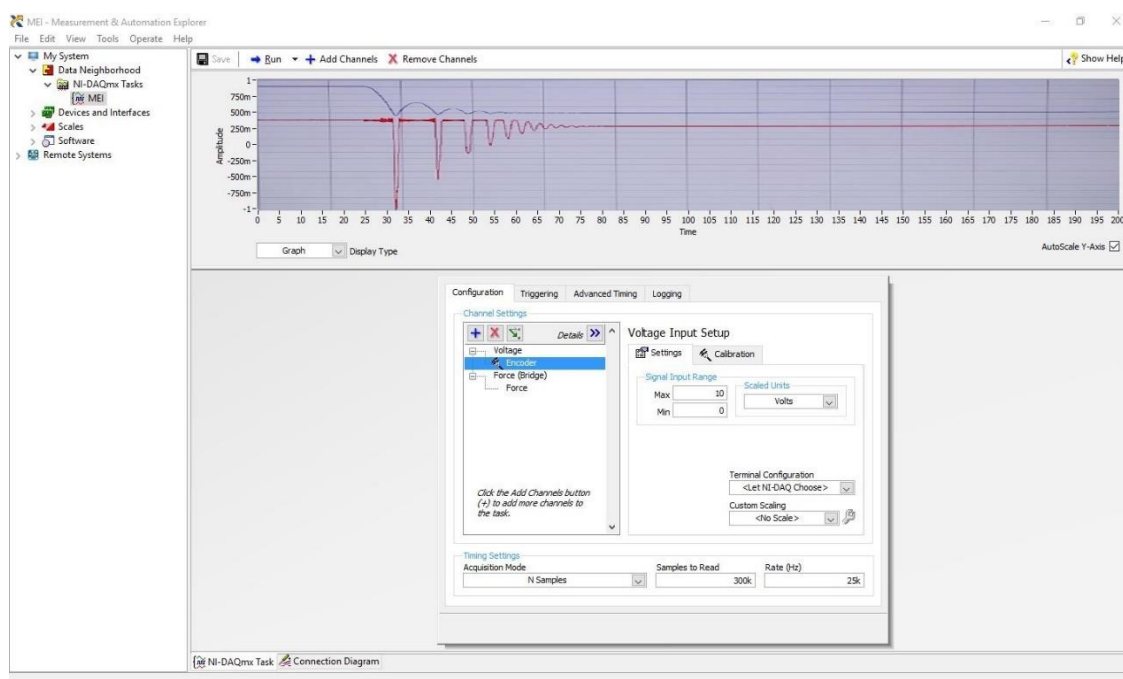


Figura 4.18-Ambiente de aquisição e monitorização do NI MAX.

A principal vantagem deste *software* é que permite criar e guardar as calibrações dos sensores utilizados, bem como importar calibrações de outros *softwares* [18]. Num trabalho anterior [4] foi criado um manual de funcionamento do *software* NI MAX para a máquina de ensaios de impacto, o que foi bastante útil durante esta dissertação.

A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 25000 Hz (a norma FIG: IV- MAG1-01.01.2016 recomenda no mínimo 5000 Hz [3]), de forma a garantir que a zona de interesse era captada eficazmente.

#### 4.1.3 Constituição e montagem das amostras testadas

Nesta secção é apresentada a constituição das amostras testadas no decorrer desta dissertação. Tratam-se de pisos de ginástica artística e são propriedade da empresa Conbego Unipessoal, Lda.

As três tipologias de praticáveis testadas são constituídas pelos mesmos componentes (molas helicoidais, placas de madeira superiores e inferiores, colchões de espuma polimérica e alcatifa), contudo apresentam combinações diferentes, que são apresentadas na Tabela 4.1. Na Figura 4.19 é apresentada a vista lateral correspondente à tipologia 1.



Figura 4.19-Estrutura da amostra de piso de ginástica artística (tipologia 1): no sentido ascendente encontram-se as molas helicoidais; as placas de madeira inferiores; as placas de madeira superiores; os colchões de espuma polimérica de quatro camadas; alcatifa (vista lateral).

Tabela 4.1-Tabela síntese com os principais componentes de cada série.

Tipologia da amostra	Principais componentes				
	Colchão espuma polimérica	Alcatifa	Configuração molas helicoidais	Espessura do estrado de suporte (comprimento e largura constantes)	
				inferior	superior
Tipologia 1	4 camadas	Mantém-se igual em todas as tipologias		Mantém-se igual tipologia 1 e 2	
Tipologia 2	8 camadas				
Tipologia 3	4 camadas			Aumenta relativamente às tipologias 1e 2	

Conhecendo agora a constituição destas amostras, apresentar-se-á o modo de montagem dos componentes. Acopladas na face inferior das placas de madeira inferiores (Figura 4.20), encontram-se as molas helicoidais. A face inversa à representada na Figura 4.20 contém bandas de velcro, responsáveis pela fixação das placas inferiores e superiores. Na Figura 4.21 estão representadas as quatro placas inferiores necessárias para a preparação da amostra.



Figura 4.20-Vista de baixo de uma placa de madeira inferior.



Figura 4.21-Vista frontal das quatro placas de madeira inferiores com bandas de velcro (dimensões 2000 mm × 3000 mm)

As placas de madeira superiores são nove, de quatro tipos diferentes (Figura 4.22), e devem ser montadas de acordo com o exibido na Figura 4.23.



Figura 4.22- Quatro tipos de placas de madeira superiores (vista de baixo).

O comprimento e largura das placas superiores é sempre igual para todas as amostras, pelo que o esquema de montagem se mantém ao longo das três tipologias testadas. Na 3ª amostra, a espessura deste componente é superior à da 1ª e 2ª (que são iguais).

Cada colchão tem dimensão de 2000 mm por 1500 mm (e quatro camadas - Figura 4.19). São necessários dois colchões para a tipologia 1 e 3 e quatro colchões para a tipologia 2 (oito camadas) que devem ser montados de acordo com o presente na Figura 4.24.

Para a finalização da preparação da amostra, falta o último componente que é uma alcatifa e deve ser colocada sobre os colchões (Figura 4.25). Este componente foi marcado de acordo com o estabelecido na norma FIG: IV-MAG1-01.01.2016 (e que já foi apresentado na Figura 1.4).



Figura 4.23-Vista superior após montagem das nove placas superiores.



Figura 4.24-Vista superior após a montagem dos colchões.



Figura 4.25-Vista superior após a colocação da alcatifa.

## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a descrição dos materiais utilizados, descrevem-se nesta secção os procedimentos seguidos para a realização dos ensaios experimentais nos pisos de ginástica artística testados.

### 4.2.1 Cálculo da altura de queda

A máquina de ensaios de impacto permite o ajuste da altura de queda. A norma indica o valor da velocidade de impacto. Desta forma, calculou-se a altura teórica de queda, através da aplicação da equação (2.20), considerando que não existem forças dissipativas (como a resistência do ar ou o atrito do impactor-sistema guiamento) a atuar no sistema. Assim, a variação da energia mecânica entre os dois pontos (instante em que se liberta o impactor, e o instante imediatamente antes do impacto) é nula, obtendo-se desta forma a expressão (4.1). A altura teórica de queda de 800 mm.

$\frac{1}{2}mv^2 = m \times g \times h$	(4.1)	<b>m</b> -Massa impactor [kg] <b>v</b> -Velocidade impacto [m/s] <b>g</b> -9,8 m/s <sup>2</sup> <b>h</b> -Altura de queda [m]
---	-------	--

### 4.2.2 Calibração dos sensores

Inicialmente, verificou-se se o equipamento já se encontrava calibrado. Quando houve necessidade de nova calibração, no momento em que foi necessário alterar o *encoder*, optou-se por realizar uma calibração com base no deslocamento, medindo simultaneamente para um ponto A e depois para um ponto B, verificando essa distância com uma fita métrica.

A célula de carga havia sido calibrada previamente. Como não se realizou nenhuma alteração, nem se desmontou a célula em momento algum desta dissertação, foi considerada que a célula de carga se encontrava calibrada.

### 4.2.3 Preparação das amostras

A primeira amostra que se preparou foi da tipologia 1 que serviu de base para a conceção das tipologias 2 e 3. Os seus elementos e o esquema de montagem encontram-se na secção 4.1.3.

A segunda amostra a ser preparada foi a de tipologia 2. Foi necessário retirar a alcatifa e colocar dois colchões sobre os já existentes. Naturalmente, ao colocar a alcatifa foi necessário garantir que as coordenadas dos pontos testados eram as mesmas. Nesta fase, a amostra estava pronta a ser testada. Testaram-se apenas alguns pontos (os mais críticos, após a análise dos resultados da 1ª tipologia e de trabalhos anteriores [4]), pois a teoria indicava um agravamento dos resultados obtidos em relação à solução testada anteriormente e fizeram-se apenas cinco ensaios.

Finalmente para a terceira amostra, de tipologia 3, foi preciso retirar a alcatifa, os quatro colchões da série de ensaios anterior e todas as placas superiores, que foram substituídas pelas placas superiores de espessura superior, e por fim, colocaram-se os dois colchões e a alcatifa novamente.

#### **4.2.4 Procedimento para a realização de ensaios de impacto**

O procedimento realizado para qualquer uma das amostras foi o mesmo, salvo algumas exceções que foram sendo referidas ao longo do documento.

Com os respetivos sensores calibrados e a amostra preparada, pretende-se encontrar o valor numérico do plano base e o primeiro passo consiste, para o ponto a testar, em descer o impactor até à superfície da alcatifa. Neste momento, coloca-se o sistema de aquisição a monitorizar a posição ao longo do tempo e guarda-se o ficheiro *Excel*<sup>®</sup> da posição.

Com o auxílio de uma fita métrica, medem-se 800 mm a partir desse plano e ajusta-se o sistema de paragem automática, garantindo que a base do impactor está 800 mm acima do plano base. Utilizou-se o NI MAX para monitorizar a posição inicial e verificar a altura de queda.

O impactor encontra-se à altura pretendida e, portanto, aciona-se o NI MAX. De seguida, puxa-se o fio responsável pelo acionamento da patilha do mecanismo de libertação do impactor. Após 12 s (que é um tempo que se verificou ser ligeiramente superior à duração de um ensaio de acordo com a taxa de aquisição de 25000 Hz), já se pode retirar e guardar os ficheiros *Excel* resultantes, uma para a força e outro para a posição.

Baixa-se o guincho, acopla-se o impactor e volta-se a subir o conjunto até à altura desejada que será no instante em que se interrompe o feixe laser do sistema de paragem. Até à próxima repetição, é necessário aguardar um tempo mínimo não inferior a 30 segundos, para garantir a recuperação da amostra e não induzir resultados irrealistas. Realiza-se o número de repetições necessárias e repete-se o que foi descrito para os outros pontos a testar.



---

# *CAPÍTULO 5*

---



## 5 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

---

Foram efetuadas três séries de ensaios experimentais com propósitos distintos. Durante a 1ª série, que foi realizada num colchão de quatro camadas, além do estudo relativo à homologação da solução construtiva (segundo os parâmetros da FIG), foi avaliado o rigor do procedimento experimental efetuado e a veracidade dos resultados experimentais recolhidos através da comparação com modelos físicos descritos em secções anteriores. Estes estudos contribuíram para certificar o bom funcionamento do sistema de aquisição de dados do banco de ensaios de impacto do DEM.

Na secção 5.1 serão apresentados os procedimentos de tratamento e análise para um ensaio isolado (Ponto 4, 6º ensaio); outras informações que possam ser convenientes serão apresentadas em anexo.

A 2ª e 3ª série de ensaios foram direcionadas para o estudo da influência da rigidez e flexibilidade do sistema global (molas e estrado e colchão de espuma) no desempenho do praticável de ginástica.

A 2ª série de ensaios foi efetuada num colchão de oito camadas, sendo que os dados reunidos foram analisados de forma a avaliar a influência desta alteração no comportamento do praticável.

A 3ª série de ensaios foi realizada num colchão de quatro camadas, contudo a espessura do estrado de suporte das molas foi aumentada em relação à 1ª série de ensaios, pelo que foi necessário averiguar as propriedades do conjunto proposto.

### 5.1 1ª SÉRIE DE ENSAIOS: ENSAIOS EXPERIMENTAIS NAS AMOSTRAS DO TIPO 1

Após a realização da primeira série de ensaios, obtiveram-se dados referentes à variação da posição ao longo do tempo, à localização do plano base e à variação da força durante o impacto para cada ponto testado. Os dados recolhidos durante o ensaio 4.6 foram utilizados para a criação dos gráficos das Figura 5.1 e Figura 5.2 .

Nesta fase do trabalho experimental era crucial averiguar se as zonas de interesse eram captadas eficazmente pelo *software*. Apesar do sistema de aquisição de dados recolher informação durante 12 s, no gráfico da Figura 5.1 e da Figura 5.2, representaram-se apenas os intervalos relevantes para essa verificação.

Confirmou-se desta forma a possibilidade de realizar a medição das três variáveis em estudo: a deflexão máxima, o afundamento máximo e a força máxima de impacto.

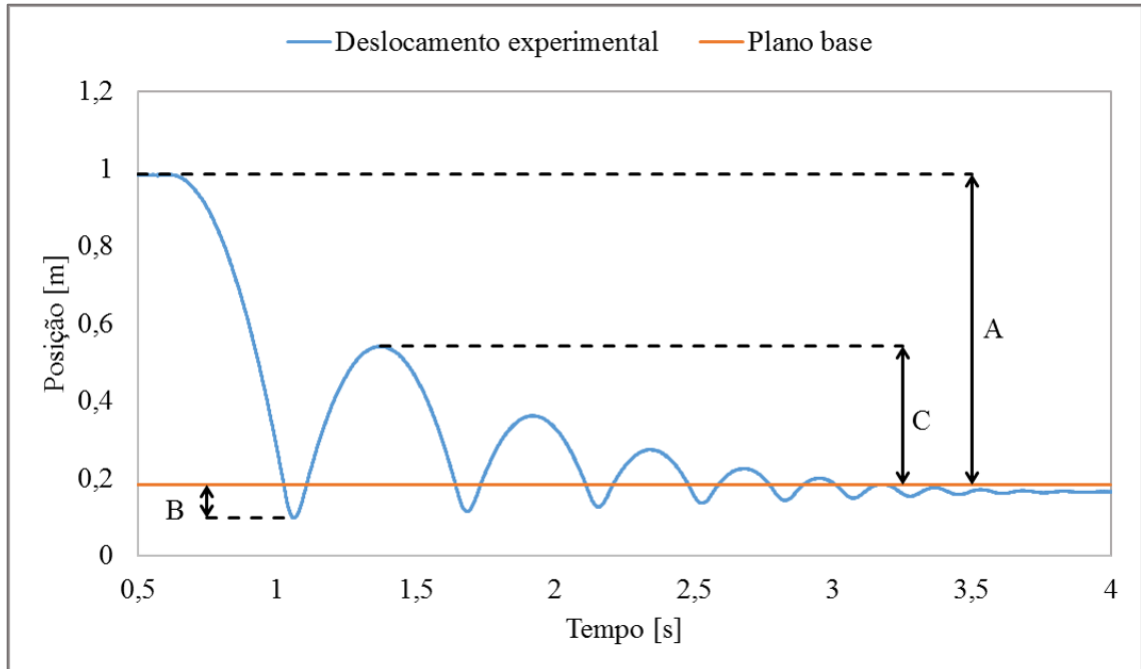


Figura 5.1-Variação da posição ao longo do tempo para o ensaio 4.6 (via *encoder* de fio).  
(A) altura de queda; (B) afundamento máximo; (C) ressalto máximo.

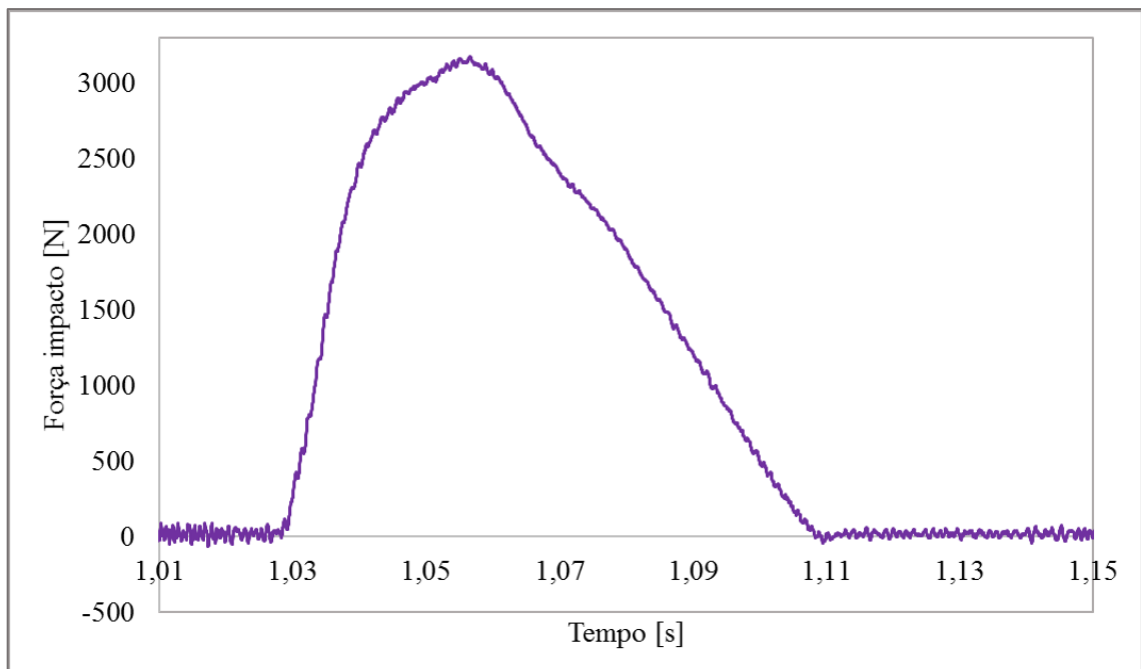


Figura 5.2-Variação da força ao longo do tempo para o ensaio 4.6 (via célula de carga).

Através da análise do gráfico da Figura 5.2 verifica-se que o impacto ocorre (aproximadamente) no intervalo [1,03-1,11 s], que no gráfico da Figura 5.1 corresponde ao intervalo onde ocorre deformação abaixo do plano base, como seria de esperar.

Devido ao grande número de repetições efetuadas, e com o propósito de melhorar a eficiência do processo de tratamento de dados, utilizou-se o *visual basic* (que funciona no *Microsoft Excel*<sup>®</sup>) para a criação de macros úteis no contexto deste trabalho e que serão apresentadas em anexo (secção 8.2).

A primeira etapa de processamento aplicada aos dados experimentais, nomeadamente às medições obtidas através do *encoder* de fio, consistiu em substituir determinados caracteres (u, k, m) presentes no ficheiro *Excel*<sup>®</sup> gerado pelo *software* NI MAX pelo seu valor numérico. Para tal, utilizou-se uma macro designada de “conversão” para o efeito que se encontra em anexo (secção 8.2.1).

Esta mesma macro foi escrita de forma a ser aplicada nos ficheiros relativos às medições da célula de carga, com o propósito de substituir os valores de força medidos em kN para N (secção 8.2.1). Neste momento, todos os dados recolhidos por ambos os sensores se encontravam preparados para serem processados.

Para facilitar o tratamento dos dados experimentais, agilizando o seu processamento via *Microsoft Excel*<sup>®</sup>, foi definida uma zona de interesse, que corresponde ao momento antes da queda livre do impactor (verifica-se a existência de um patamar, pois o impactor está parado) e prolonga-se até pouco depois do primeiro ressalto.

Através da observação do gráfico da Figura 5.1 verifica-se que para o ensaio 4.6 esse intervalo tem início no instante  $t=0,5$  s e fim no instante  $t=1,5$  s. Estes valores variam entre ensaios, pois o tempo de reação do operador entre a ordem de arranque de leitura do *software* e o puxar do trinco que origina a queda do impactor alteram-se a cada repetição.

Foi criada uma macro, designada “extremos”, através da qual é possível definir os limites desse intervalo para cada ensaio de forma automática e que se encontra disponível para ser consultada na secção 8.2.2.

### 5.1.1 Tratamento e análise dos dados experimentais recolhidos através do *encoder*

Trabalhos desenvolvidos anteriormente no banco de ensaios utilizado, sugerem que a aplicação de um filtro *butterworth* aos dados experimentais adquiridos através do *encoder* de fio apresenta inúmeras vantagens [4].

A mais evidente é a eliminação do ruído presente nos dados experimentais; a outra relaciona-se com a possibilidade de obter a 1ª e 2ª derivada a partir do deslocamento filtrado que correspondem à velocidade e aceleração, respetivamente (Tabela 5.1).

Foi consultada a bibliografia [19] onde se disponibiliza um *add-in* para *Microsoft Excel*®, que é um filtro *butterworth* com o respetivo manual de utilização.

Tabela 5.1-Tabela de síntese das etapas de processamento dos dados medidos pelo *encoder* de fio.

Sensor	Grandezas medidas	Pré-processamento	Grandezas obtidas
<i>Encoder</i> de fio	-Deslocamento -Tempo	Filtro <i>Butterworth</i> : filtragem e diferenciação numérica (recomenda-se a consulta do anexo 8.2.3)	-Deslocamento “filtrado” -Velocidade -Aceleração -Tempo
	<b>Pós-processamento</b>		
	<p><b>1º método</b> :2ª Lei de Newton (capítulo 2.2.1);</p> <p><b>2º método</b>: Teorema energia-trabalho (capítulo 2.3.3).</p> <p>-Força máxima impacto <i>encoder</i>.</p>		

Após a aplicação do filtro *butterworth* (secção 8.2.3) efetuou-se uma verificação do seu desempenho (secção 8.2.5) na zona onde o deslocamento é mínimo (gráfico da Figura 5.3) e máximo ( gráfico da Figura 5.4), de forma a possibilitar o cálculo da deflexão e ressalto máximo.

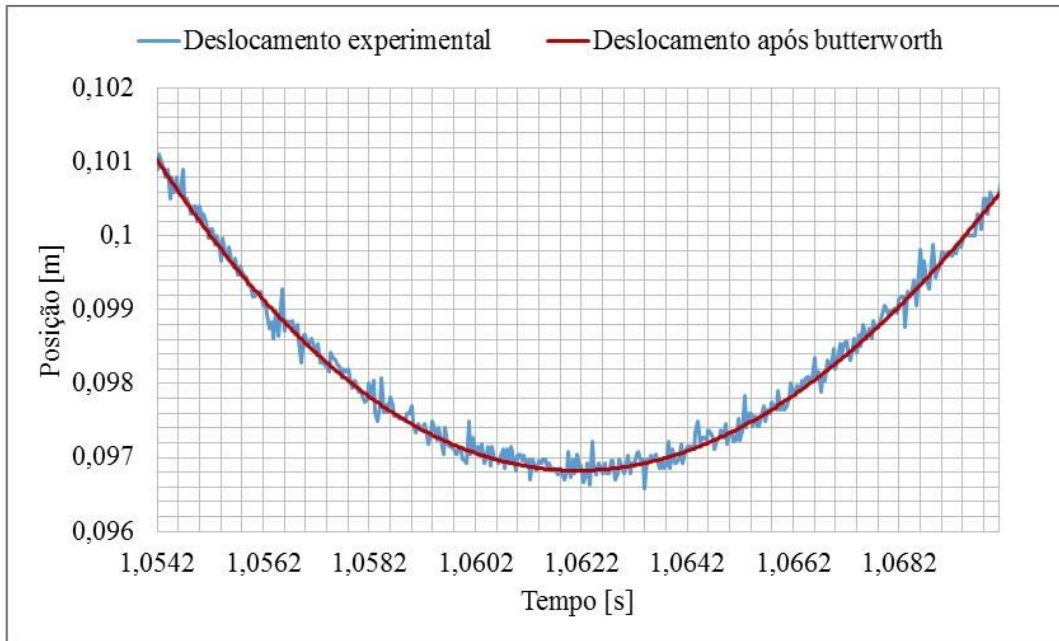


Figura 5.3-Desempenho do filtro *butterworth* para o ensaio 4.6 na zona de deflexão máxima.

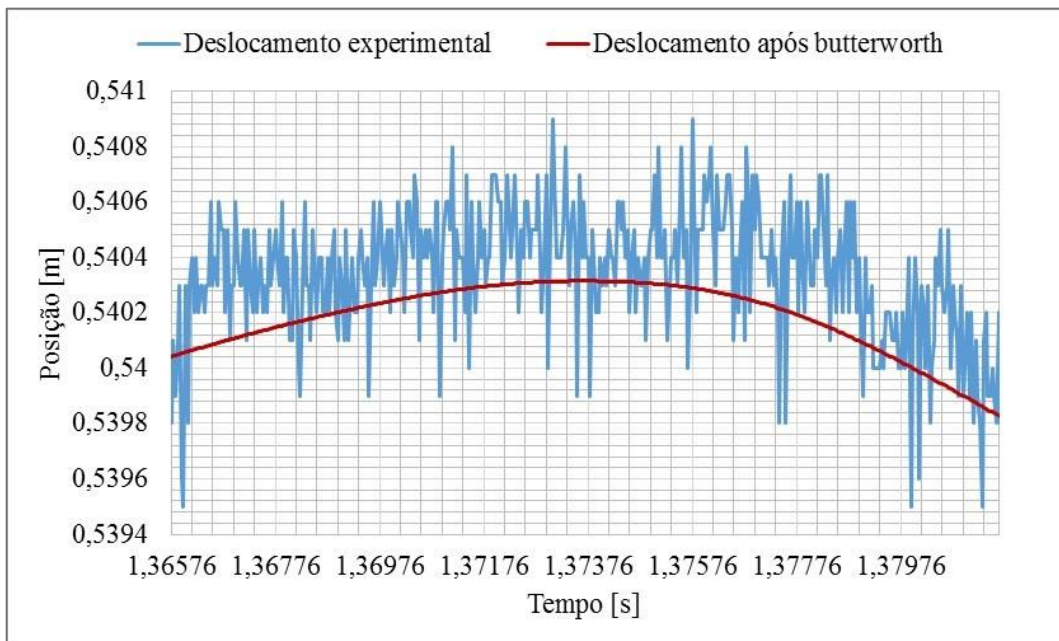


Figura 5.4-Desempenho do filtro *butterworth* para o ensaio 4.6 na zona de ressalto máximo.

Observando os gráficos da Figura 5.3 e Figura 5.4 verifica-se que os dados filtrados captam com rigor o comportamento apresentado pelos dados experimentais (o erro é da ordem de  $\pm 0,1$  mm para o primeiro caso e de  $\pm 0,3$  mm para o segundo caso) (secção 8.2.5). Todos os cálculos executados no seguimento desta dissertação utilizaram os dados de deslocamento após aplicação do filtro.

Os dados resultantes do uso do filtro *butterworth* foram empregues na criação dos gráficos da Figura 5.5 e da Figura 5.6, que mostram respetivamente, a variação da velocidade e da aceleração ao longo do tempo. Para a correta análise destes gráficos, definiu-se um referencial, que é um eixo vertical crescente que aponta para cima e com origem fixada no solo (posição = 0 m).

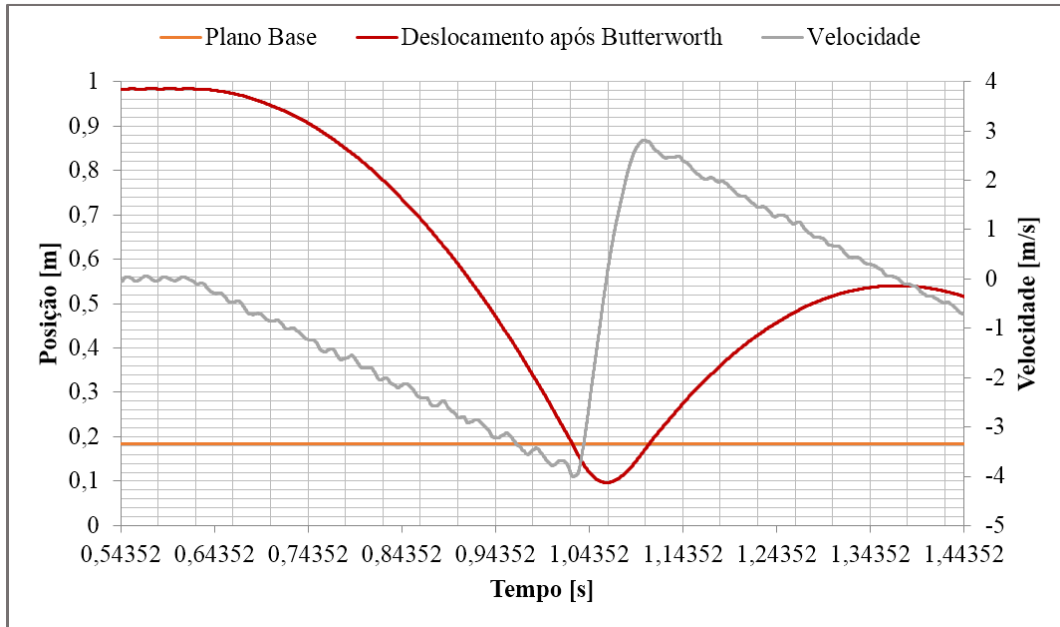


Figura 5.5-Variação da velocidade ao longo do tempo, deslocamento e plano base (ensaio 4.6).

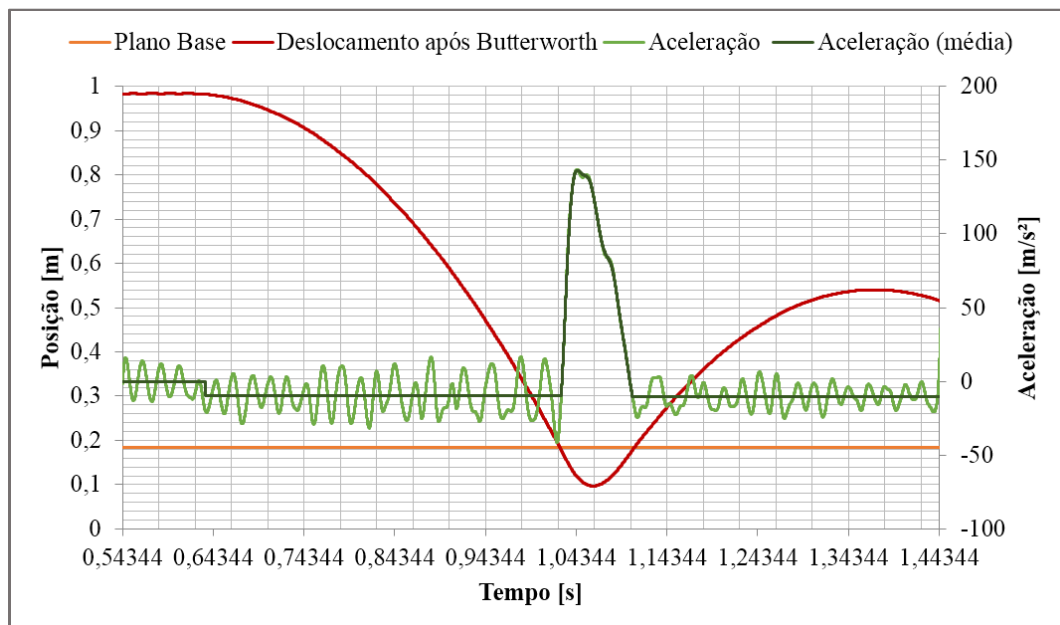


Figura 5.6-Variação da aceleração ao longo do tempo (original e considerando a aceleração média na zona onde o impactor está livre e parado), deslocamento e plano base (ensaio 4.6).



Com base nos gráficos apresentados anteriormente, criou-se os gráficos da Figura 5.7 e Figura 5.8, onde se dividiu o intervalo temporal em quatro zonas que serão analisadas atempadamente.

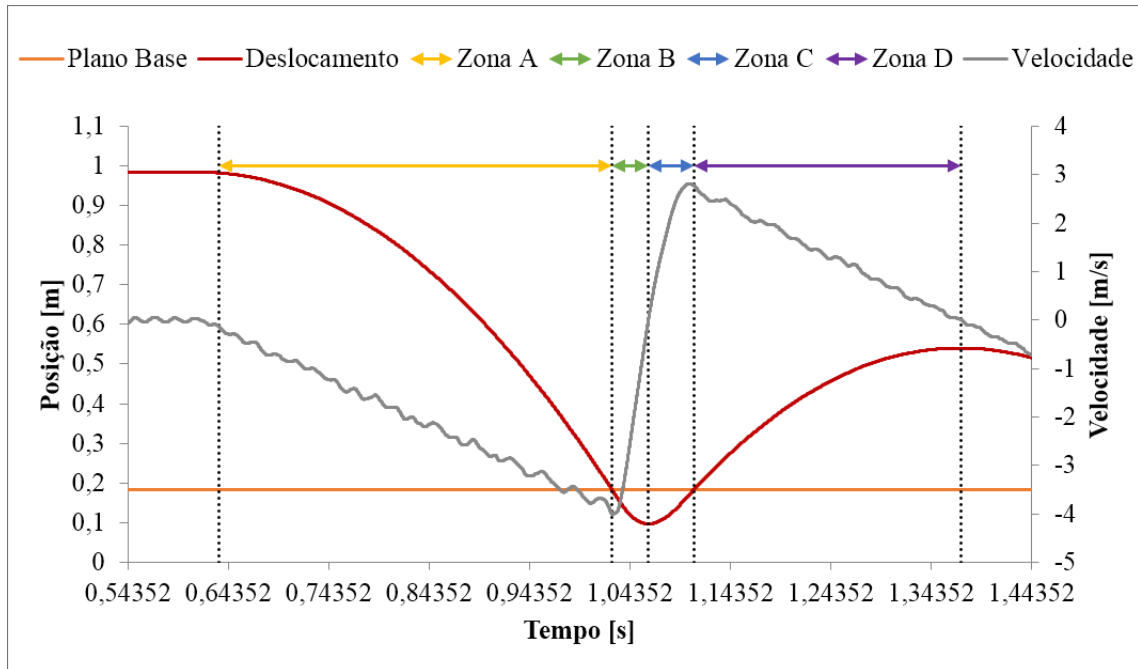


Figura 5.7- Observação detalhada da variação da velocidade, de acordo com a zona.

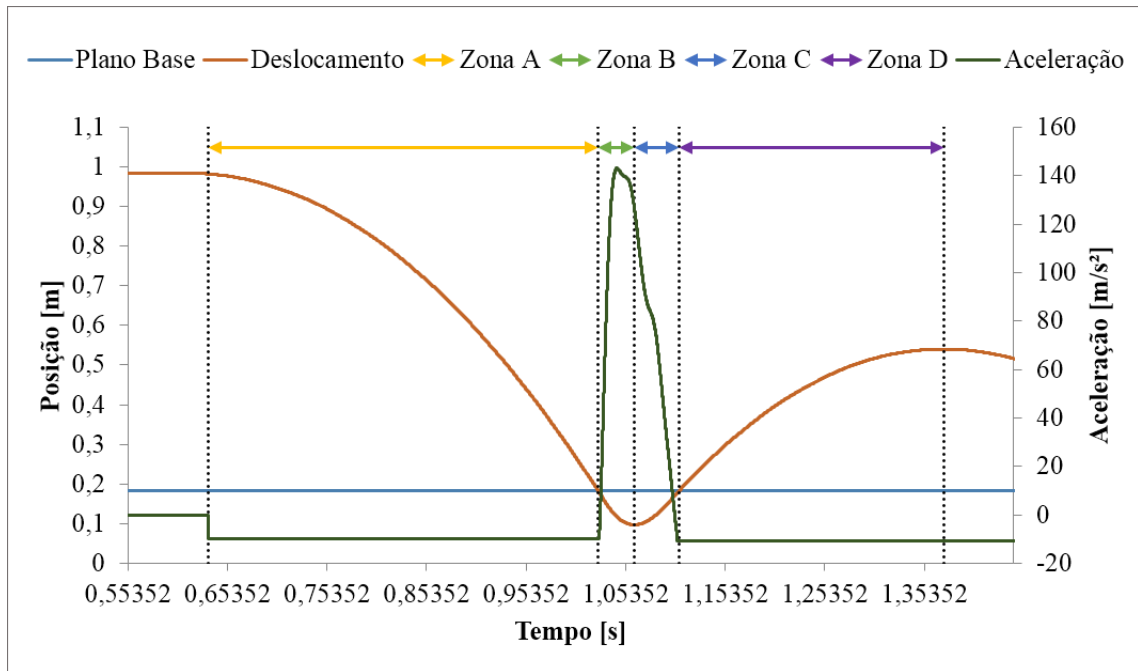


Figura 5.8- Observação detalhada da variação da aceleração, de acordo com a zona.

Para um melhor entendimento dos gráficos representados anteriormente da física que governa o sistema, foi concebida a Tabela 5.2 para sistematização de conceitos.

Tabela 5.2-Tabela síntese com a descrição das zonas de interesse de acordo com o intervalo temporal (ensaio 4.6) e as grandezas com maior relevância para cada zona descrita.

<b>Zona/Tempo [s]</b>	<b>Descrição das zonas de interesse</b>	<b>Grandezas importantes</b>
<b>A</b> [0,63464-1,0258*]	Queda livre do impactor, engloba o instante em que é largado o impactor até ao momento imediatamente antes do impacto.	Aceleração da gravidade (Figura 5.6). Velocidade de impacto (velocidade instantânea, imediatamente antes do impacto [3]).
<b>B</b> [1,0284-1,06212]	Engloba o instante em que se dá o contacto entre os dois elementos do sistema até ao momento em que se atinge a deflexão máxima.	<b>Deflexão máxima</b> (Na transição da zona B para a zona C do Figura 5.7 atinge-se a cota mínima). <b>Força máxima de impacto</b> (Na zona B do Figura 5.8 atinge-se a aceleração máxima).
<b>C</b> [1,06216-1,1076*]	Abrange o instante após ser atingida a cota mínima até ao momento em que deixa de existir contacto entre o impactor e o praticável.	Velocidade de ressalto (velocidade no instante em que deixa de existir contacto entre o impactor e o praticável após o impacto).
<b>D</b> [1,10764-1,37368]	Neste intervalo, apenas a gravidade atua sobre o impactor.	Aceleração da gravidade (Figura 5.6). <b>Altura de ressalto máximo.</b>

\*considerou-se o instante em que o impactor transpõe o plano base.

Analisando a Tabela 5.2, verificamos que existem dois intervalos onde o impactor apenas está sujeito à ação da gravidade, o intervalo A e D. Naturalmente, podemos assumir que nestes intervalos a resistência do ar é considerada desprezível e que qualquer objeto acelera na direção da terra com uma aceleração de  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

A velocidade de impacto e de ressalto foram calculadas considerando a velocidade instantânea no momento em que impactor o cruza o plano base, antes e depois do impacto (o programa utilizado para este cálculo é apresentado no anexo 8.2.7)

Criou-se o gráfico da Figura 5.9 para facilitar a análise da variação da velocidade e aceleração, simultaneamente. Na Tabela 5.3 encontra-se informação relativa ao sentido da velocidade e da aceleração ao longo do ensaio, para os intervalos definidos anteriormente.

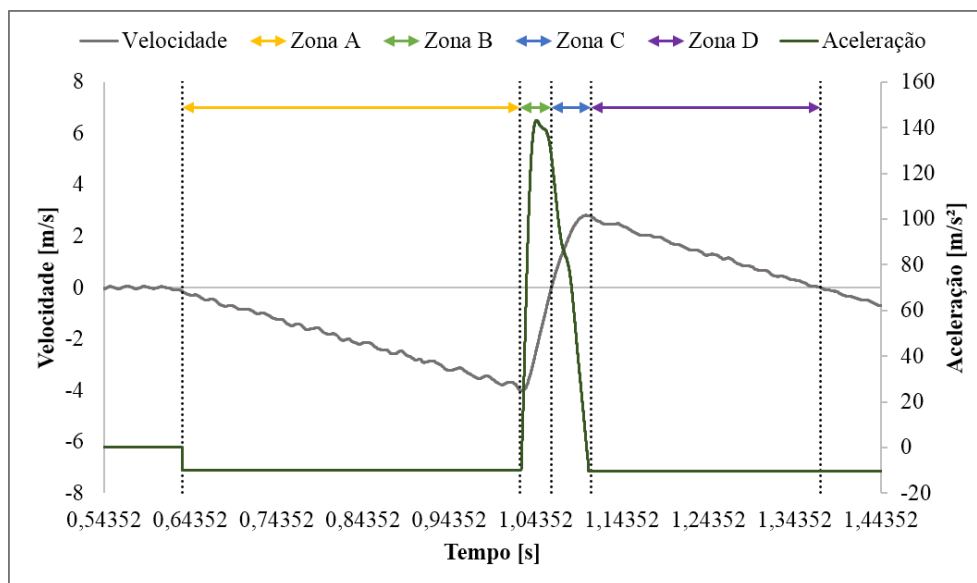


Figura 5.9-Observação detalhada da variação da velocidade e aceleração ao longo do tempo, de acordo com a zona (ensaio 4.6).

Tabela 5.3-Sentido da velocidade e aceleração para cada zona de interesse (Figura 5.9).

Zona	Velocidade [m/s]	Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	Descrição do movimento do impactor
<b>A</b>	-	-	Aumento do módulo da velocidade e aceleração
<b>B</b>	-	+	Diminuição do módulo da velocidade e desaceleração
<b>C</b>	+	+	Aumento do módulo da velocidade e aceleração
<b>D</b>	+	-	Diminuição do módulo da velocidade e desaceleração

Da análise da Tabela 5.3, verifica-se que ocorre uma inversão do sentido da velocidade da zona B para a zona C. Nesta situação, garantidamente que a velocidade foi nula na passagem entre estes dois intervalos, o que se verifica através da análise do Figura 5.9. É nesta transição que se atinge o ponto de deflexão máxima do praticável (recomenda-se a consulta do gráfico da Figura 5.7).

O módulo da velocidade volta a ser nulo no último instante da zona D (Figura 5.9), que corresponde ao momento em que se atinge a altura de ressalto máximo no gráfico da Figura 5.7.

De acordo com a informação descrita anteriormente criou-se o gráfico da Figura 5.10 e da Figura 5.11, nos quais são apresentados o valor médio e o intervalo de confiança da aceleração para a zona A (queda livre) e para a zona D (lançamento vertical), para todos os pontos testados (o método de cálculo destas variáveis pode ser consultado no anexo 8.2.7).

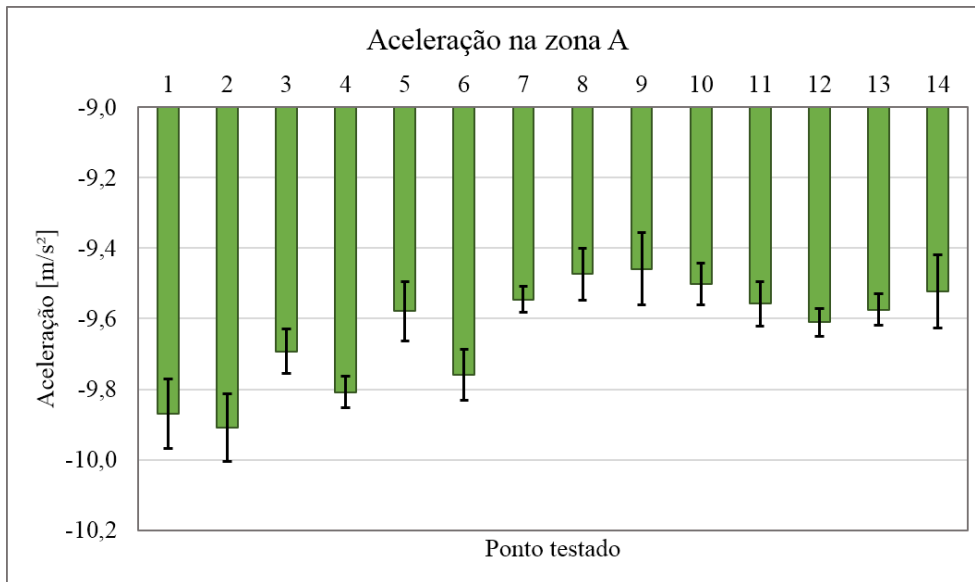


Figura 5.10-Valor médio e intervalo de confiança da aceleração na zona A para os 14 pontos.

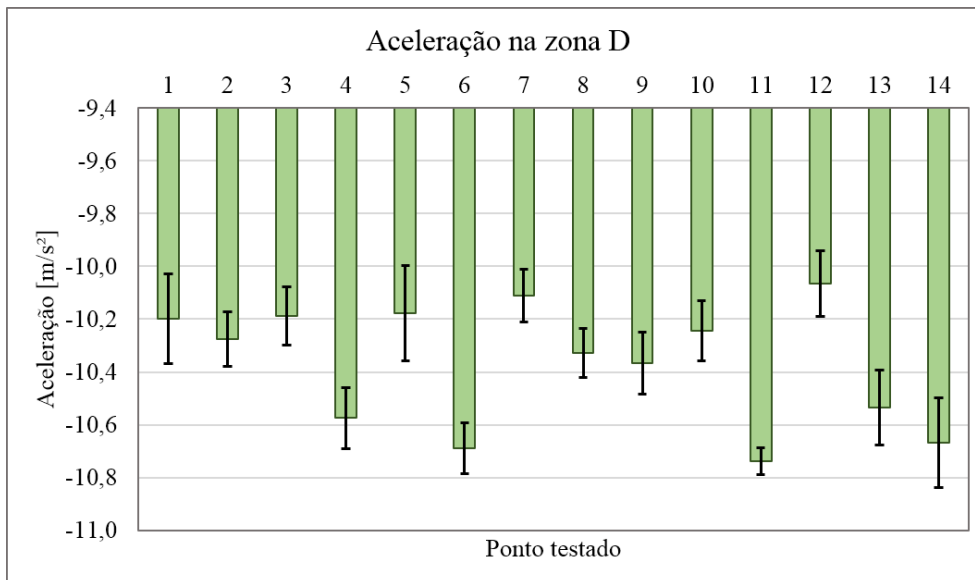


Figura 5.11-Valor médio e intervalo de confiança da aceleração na zona D para os 14 pontos.

De acordo com o esperado, a aceleração na zona A e na zona D tem sentido negativo e é aproximadamente constante e muito próxima de  $9,8 \text{ m/s}^2$  (Figura 5.10 e Figura 5.11).

Um dos requisitos da norma FIG: IV-MAG1.01.01.2016 para cada ensaio realizado era garantir que a velocidade de impacto pertencia ao intervalo [3,84-4,08 m/s]. Para os valores médios de velocidade de impacto apresentados no gráfico da Figura 5.12 e tendo em conta o intervalo de confiança obtido, essa condição verificou-se para cada um dos pontos testados [3]. No gráfico da Figura 5.13 encontram-se os valores médios e o intervalo de confiança para a velocidade de ressalto.

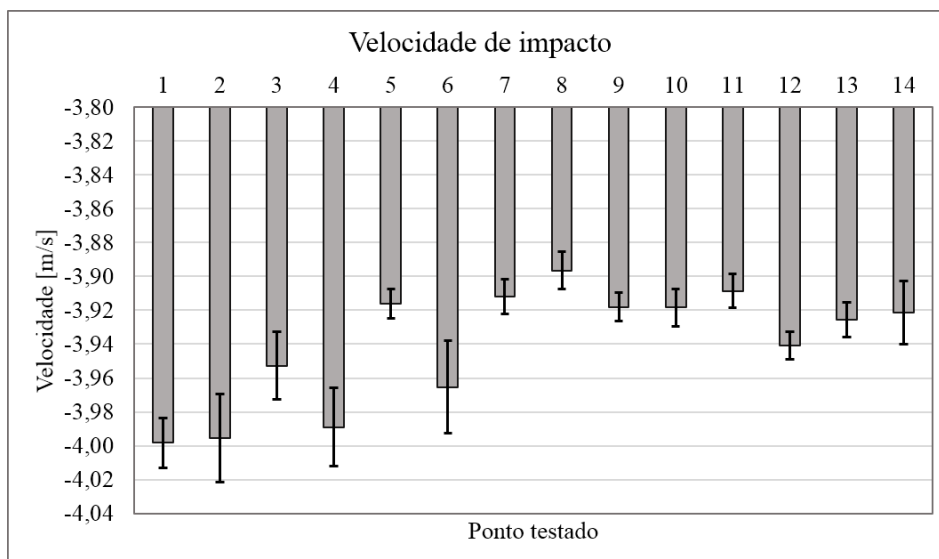


Figura 5.12-Valor médio e intervalo de confiança da velocidade de impacto para os 14 pontos.

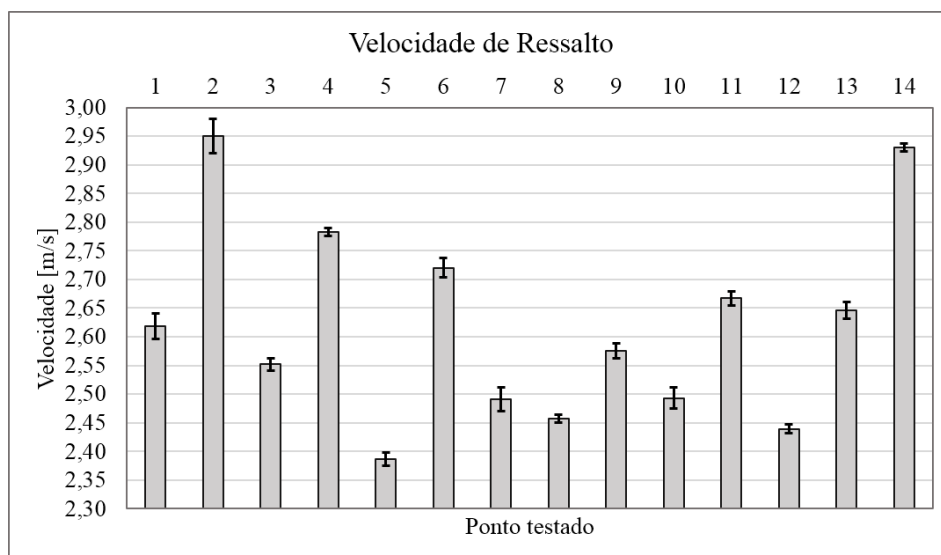


Figura 5.13-Valor médio e intervalo de confiança da velocidade de ressalto para os 14 pontos.

O método utilizado para calcular a velocidade de impacto e a velocidade de ressalto pode ser consultado no anexo 8.2.7. A velocidade de impacto é negativa (Figura 5.12) e a velocidade de ressalto é positiva (Figura 5.13), como era de esperar pela análise da Figura 5.9.

Cálculo da força máxima de impacto com base nos dados do *encoder*

Serão apresentados dois métodos distintos utilizados para o cálculo da força de impacto com base nos dados do *encoder*. O 1ª método é uma aplicação direta da 2ª lei de Newton, enquanto o 2ª método se baseia no teorema da energia-trabalho, considerando que este sistema é não conservativo.

Pela 2ª lei de Newton (2.5), o somatório de todas as forças aplicadas num sistema num determinado instante é igual ao produto da massa pela aceleração total do sistema. Considerando que no momento do impacto atuam apenas duas forças no sistema (a força de reação ao contacto e o peso do impactor), é possível escrever a expressão (5.1).

Como a aceleração em queda livre é negativa (gráfico da Figura 5.10 e da Figura 5.11) a expressão anterior pode ser reescrita de acordo com o descrito na expressão (5.2). A aceleração máxima foi obtida de acordo com o que está descrito no anexo 8.2.3 (Figura 8.7).

$F_{\text{impacto}} - P = ma$ $a = a_{\text{max}} - a_{\text{queda livre}}$	(5.1)	<b>F<sub>impacto</sub></b> -Força impacto [N] <b>P</b> -Peso [N] <b>m</b> -Massa total[kg]
$F_{\text{impacto}} = m(a_{\text{max}} + g)$	(5.2)	<b>a</b> -Aceleração [m/s <sup>2</sup> ] <b>a<sub>queda livre</sub></b> -9,8 m/s <sup>2</sup> <b>a<sub>max</sub></b> -Aceleração máxima medida pelo <i>encoder</i> [m/s <sup>2</sup> ]

A expressão (2.24) relaciona o trabalho de uma força não conservativa com a variação da energia mecânica do sistema (Teorema Energia-Trabalho), a equação (5.3) retrata essa relação. A partir da equação (5.3) foi possível calcular o valor numérico da força de impacto através da expressão (5.4).

$Ec_i + Ep_i = Ec_f + Ep_f + F \cdot d$	(5.3)	<b>Ec<sub>i</sub>/Ec<sub>f</sub></b> -Energia cinética inicial/final [J] <b>Ep<sub>i</sub>/Ep<sub>f</sub></b> -Energia potencial gravítica inicial/final [J] <b>F</b> -Força [N] <b>d</b> -Deslocamento [m]; <b>h<sub>i</sub>/h<sub>f</sub></b> -Altura inicial/final [m]
$F = \frac{\frac{1}{2}m(v_i^2 - v_f^2) + mg(h_i - h_f)}{(h_i - h_f)}$	(5.4)	<b>v<sub>i</sub>/v<sub>f</sub></b> -Velocidade antes e depois do impacto [m/s] <b>m</b> -Massa [Kg] <b>g</b> -9,8 m/s <sup>2</sup>

Criou-se a Figura 5.14 de forma a facilitar o entendimento das equações (5.3) e (5.4), as variáveis representadas na figura são as mesmas utilizadas nas equações.

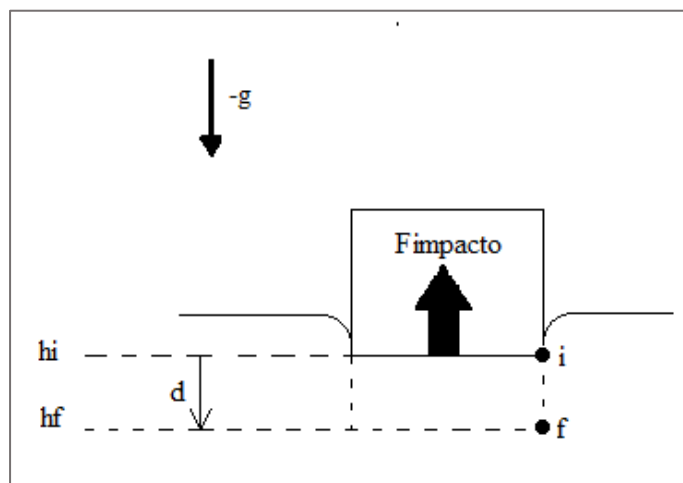


Figura 5.14-O esquema pretende representar as forças que atuam no impactador durante o impacto.

Os valores médios de força máxima de impacto e o respetivo intervalo de confiança para cada ponto, para a célula de carga e para o *encoder* de fio para ambos os métodos utilizados (2ª lei de Newton e pelo teorema energia-trabalho), são apresentados no gráfico da Figura 5.15.

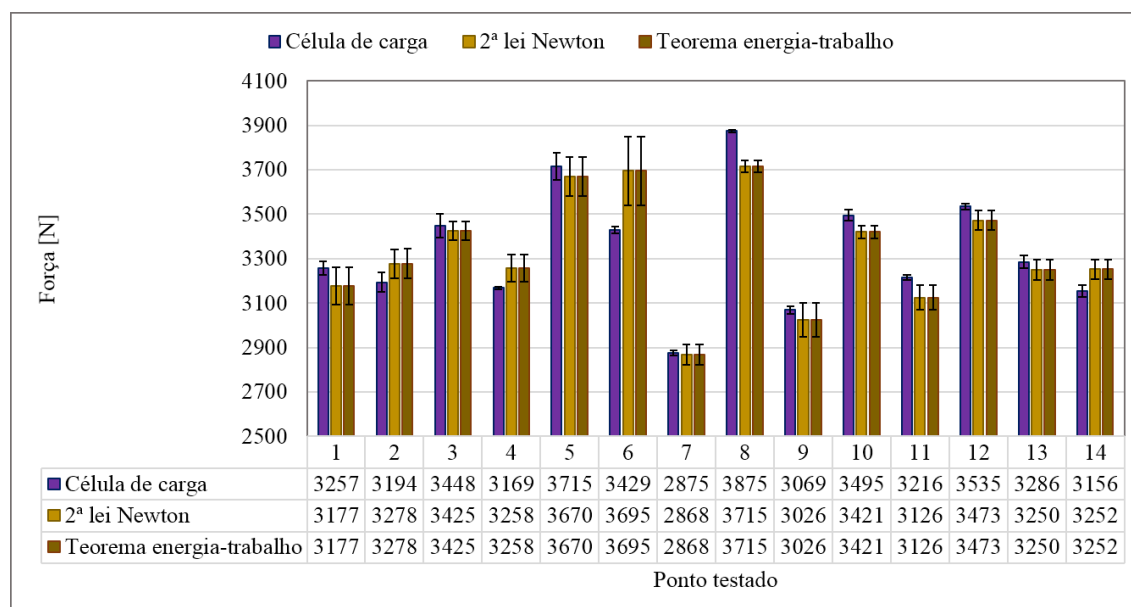


Figura 5.15-Valor médio da força de impacto e intervalo de confiança; medida pela célula de carga; calculada através dos dados do *encoder*, por dois métodos distintos, o primeiro através da 2ª lei de Newton e o segundo a partir da variação da energia mecânica do sistema.

Para a obtenção da força máxima de impacto através do teorema energia-trabalho, recorreu-se aos dados relativos ao deslocamento (do *encoder*) e à velocidade do impactor para o cálculo da energia potencial e cinética para cada instante do ensaio (foram utilizadas as expressões (2.15) e (2.14) para o efeito). Recomenda-se a consulta do anexo 8.2.9 onde estão expostas as rotinas que permitiram efetuar estes cálculos.

Para calcular a força máxima de impacto medida através da célula de carga, utilizou-se a rotina apresentada no anexo 8.2.8 (Figura 8.18).

Verifica-se que os resultados da força são iguais, independentemente do método utilizado (expressões (5.2) e (5.4) ), o que já era de esperar visto que os dados originais utilizados na aplicação destes métodos foram os mesmos (é usado o deslocamento medido pelo *encoder* e a velocidade e aceleração obtidas após a aplicação do filtro *butterworth*).

Por outro lado, esta convergência de resultados permite validar cada um destes métodos. Os valores de força máxima de impacto obtidos através dos dois sensores utilizados, a célula de carga e o *encoder*, são aproximadamente iguais.

A grande semelhança entre os resultados da força obtidos pelas expressões (5.2) e (5.4) levantou suspeitas relativamente à equivalência das expressões. De facto, igualando a equação (5.2) à (5.4), obtemos a expressão (5.5).

De facto, da expressão (2.4) temos  $a=v(dv/ds)$ , pelo que, para dois instantes muito próximos, a aceleração é obtida pela expressão (5.7).

$F = ma + mg = \frac{1}{2}m \frac{v_i^2 - v_f^2}{h_i - h_f} + mg$	(5.5)	<b>F</b> -Força [N] <b>vi/vf</b> -Velocidade antes e depois do impacto [m/s]
Com, $a = \frac{v_i^2 - v_f^2}{h_i - h_f}$	(5.6)	<b>hi/hf</b> -Altura inicial/final [m] <b>m</b> -Massa [kg] <b>g</b> -9,8 m/s <sup>2</sup>
$a = v_{média} \frac{dv}{ds} = \frac{v_i - v_f}{h_i - h_f}$	(5.7)	<b>a</b> -Aceleração [ m/s <sup>2</sup> ] <b>v<sub>média</sub></b> -Velocidade média [m/s]



No gráfico da Figura 5.16 encontra-se um gráfico velocidade-posição. Da observação desta figura facilmente se verifica que  $v=(v_i+v_f)/2$  (é o valor médio), portanto, substituindo na expressão (5.7), obtemos a expressão (5.8).

$a = \frac{v_i + v_f}{2} \times \frac{v_i - v_f}{h_i - h_f} \quad (5.8)$	
--	--

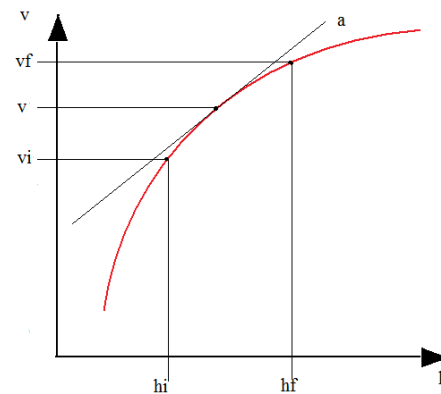


Figura 5.16-Gráfico velocidade-posição.

A equação (5.8), após manipulação, permite obter a diferença de quadrados no numerador e conduz exatamente à expressão (5.6). Consequentemente, as equações (5.2) e (5.4) são a mesma.

#### Trabalho realizado pela força de impacto

Como consequência da aplicação do teorema energia-trabalho (5.3), representou-se o trabalho realizado pela força de impacto em função do tempo, para o intervalo em que existe contacto entre o impactor e o praticável, gráfico da Figura 5.17 (recomenda-se a consulta do anexo 8.2.9).

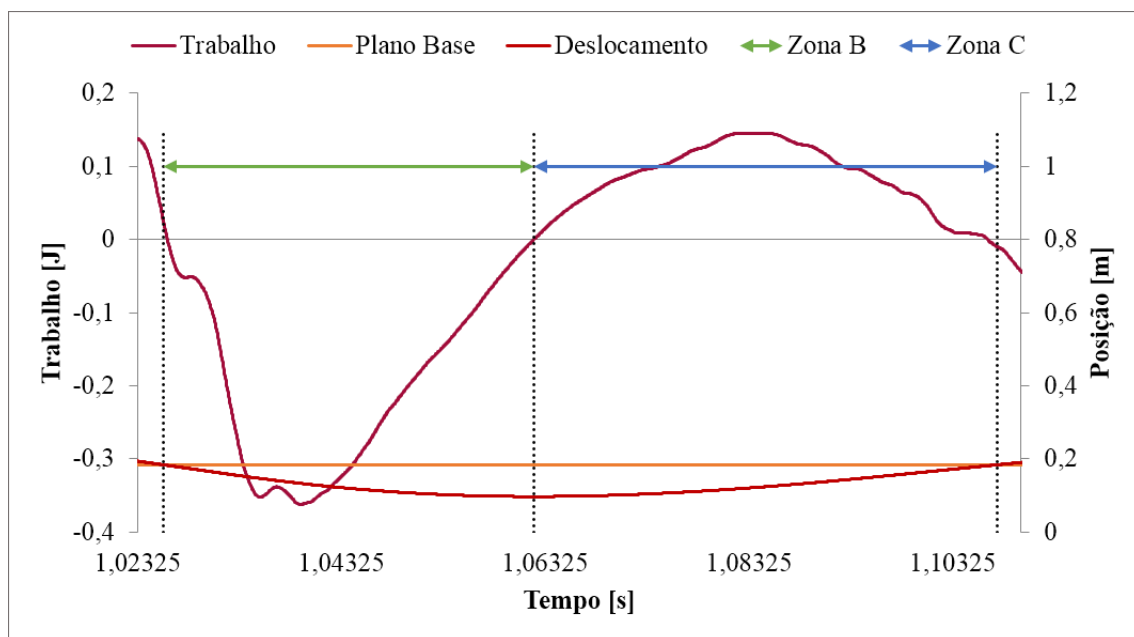


Figura 5.17-Trabalho realizado pela força de impacto durante o impacto (ensaio 4.6).

Através da análise do gráfico da Figura 5.17 é possível concluir que a curva do trabalho intersecta o eixo das ordenadas em três pontos distintos. Nesses instantes, o trabalho é nulo, concluindo-se, portanto, que esses pontos representam respectivamente, o instante imediatamente antes do impacto, o instante em que a deformação é máxima e finalmente o instante em que nenhuma força atua sobre o impactor e, portanto, o contacto entre os dois elementos do sistema cessa.

O gráfico da Figura 5.17 foi dividido em zonas, como já havia sido feito previamente, de forma a facilitar a compreensão do parágrafo anterior, pois os instantes em que o trabalho é nulo, correspondem aos instantes onde se dá início e finaliza o contacto entre o impactor e o praticável, e o ponto onde se atinge a deflexão máxima.

Importa referir que, até ao momento em que se atinge a deformação máxima ( $t=1,06212$  s) o trabalho é negativo, isto porque a força e o deslocamento têm a mesma direção, mas sentidos opostos. Do instante  $t=1,06212$  s até ao momento em que deixa de existir contato entre os elementos, o trabalho é positivo, pois a força e o deslocamento têm igual direção e sentido (Figura 5.17).

Através desta abordagem, é possível encontrar o intervalo onde ocorre o contacto do impactor com o praticável, sem depender da medição do plano base.

## Energia mecânica e dissipação de energia

A lei da conservação de energia assegura que a energia total de um sistema é conservada, no entanto, a energia de um certo tipo pode ser convertida em formas de energia não útil. Quando existe dissipação de energia, a energia mecânica do sistema varia (consultar Figura 5.18).

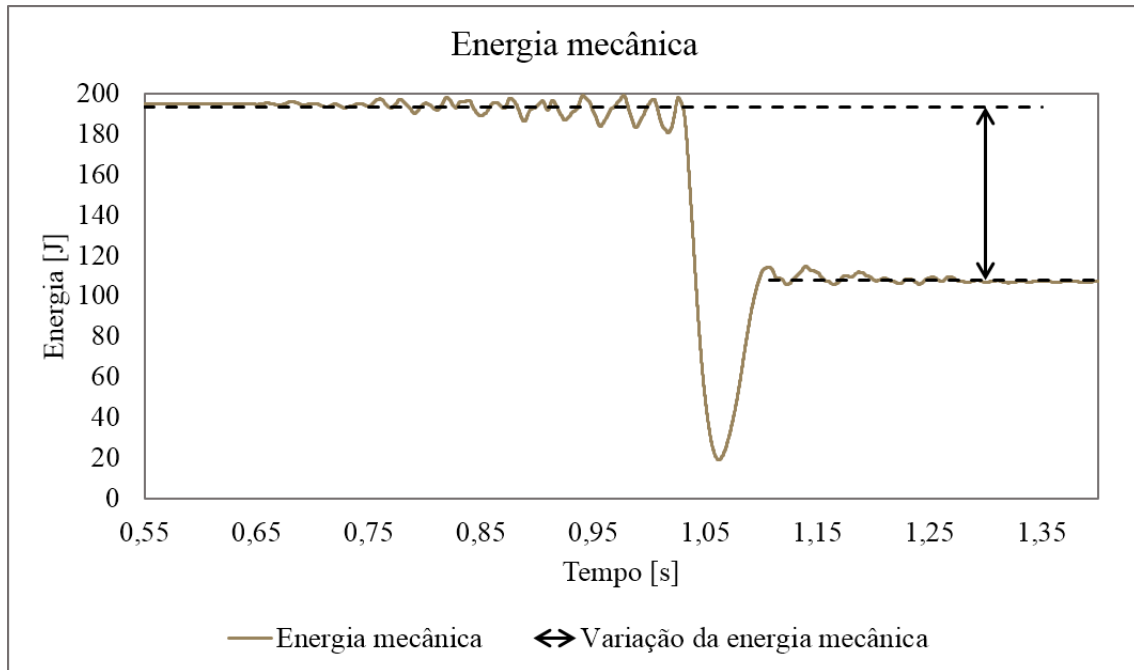


Figura 5.18-Variação da energia mecânica ao longo do ensaio 4.6.

De acordo com o gráfico da Figura 5.18 existem duas zonas em que a energia mecânica calculada pela expressão (2.19) permanece constante, e que correspondem aos intervalos onde apenas o peso (força conservativa) atua sobre o impactor (recomenda-se a consulta do anexo 8.2.9 onde é explicado o processo de cálculo da energia mecânica).

## Energia cinética e coeficiente de restituição cinética (COR)

Concluiu-se anteriormente que o sistema em análise é dissipativo. Nesta secção, pretendeu-se aferir quantitativamente a parcela de energia que é dissipada pelo sistema. Para isso, foi criado o gráfico da Figura 5.19 onde se encontra representada a variação da energia cinética ao longo do ensaio 4.6 (no anexo 8.2.9 é explicado como se obtém a energia cinética).

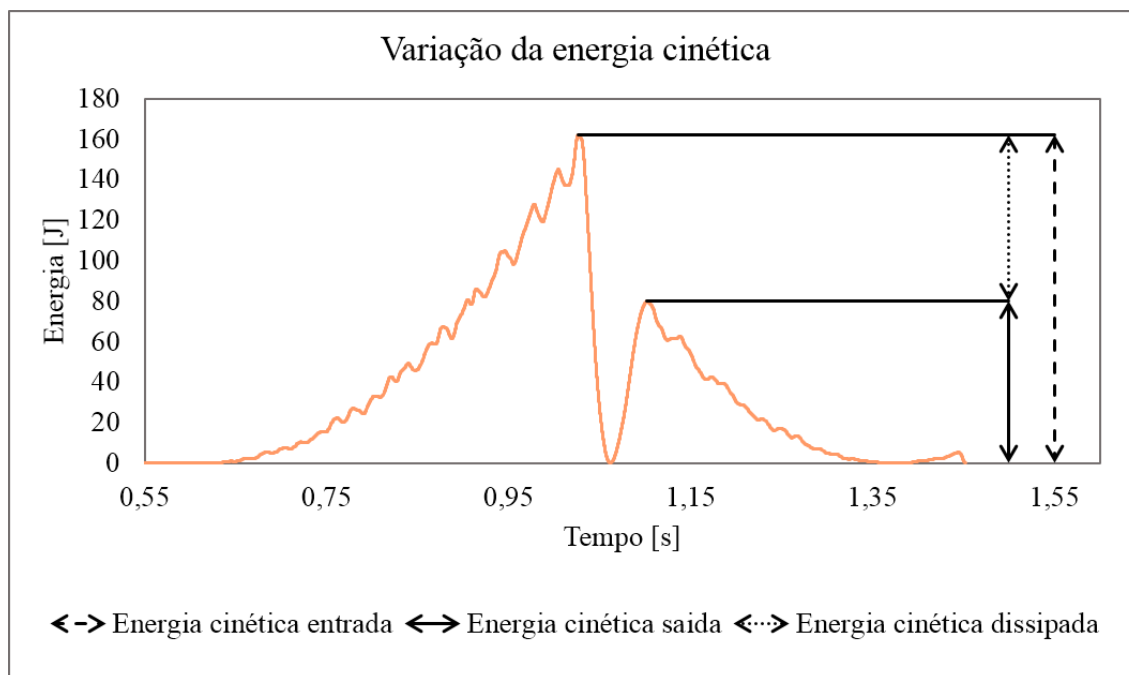


Figura 5.19-Variação da energia cinética ao longo do ensaio 4.6.

Verifica-se que até ao impacto, a energia cinética aumenta; após o impacto a energia cinética é menor e diminui até ao ressalto, onde se anula. Assim, a energia cinética é parcialmente conservada durante a colisão entre os elementos do sistema (Figura 5.19), a restante cota energética corresponde à fração que é dissipada.

Quando a energia cinética, após o impacto, é menor que antes do impacto, o coeficiente de restituição cinética (COR) é um valor entre 0 e 1 (Tabela 3.2) e é o que se verifica de acordo com os dados da Tabela 5.4.

Tabela 5.4-Coeficiente de restituição cinética médio (COR) para cada um dos pontos ensaiados.

COR		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
	Média	0,67	0,75	0,65	0,7	0,63	0,69	0,65
	Desvio padrão	0,005	0,007	0,005	0,006	0,003	0,005	0,004
		<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
	Média	0,65	0,69	0,67	0,7	0,64	0,69	0,77
Desvio padrão	0,004	0,008	0,005	0,003	0,004	0,006	0,004	

Calculou-se a energia cinética dissipada através do balanço energético descrito na equação (5.9), considerando que a energia cinética inicial e final são equivalentes à energia cinética antes e após o impacto (no anexo 8.2.9 é explicado como se obtém a energia cinética antes e depois do impacto).

A equação (5.10) é uma adaptação da equação (3.6) e utiliza o COR para calcular a parcela de energia dissipada.

$Ec_d = Ec_i - Ec_f$	(5.9)	<b>COR</b> -Coeficiente de restituição cinética. <b>E<sub>ci</sub>/E<sub>cf</sub>/E<sub>cd</sub></b> -Energia cinética inicial/final/dissipada [J]
$Ec_d = Ec_i \times (1 - COR^2)$	(5.10)	

Os valores obtidos pelas duas metodologias são iguais e foram utilizados para a construção do Figura 5.20.

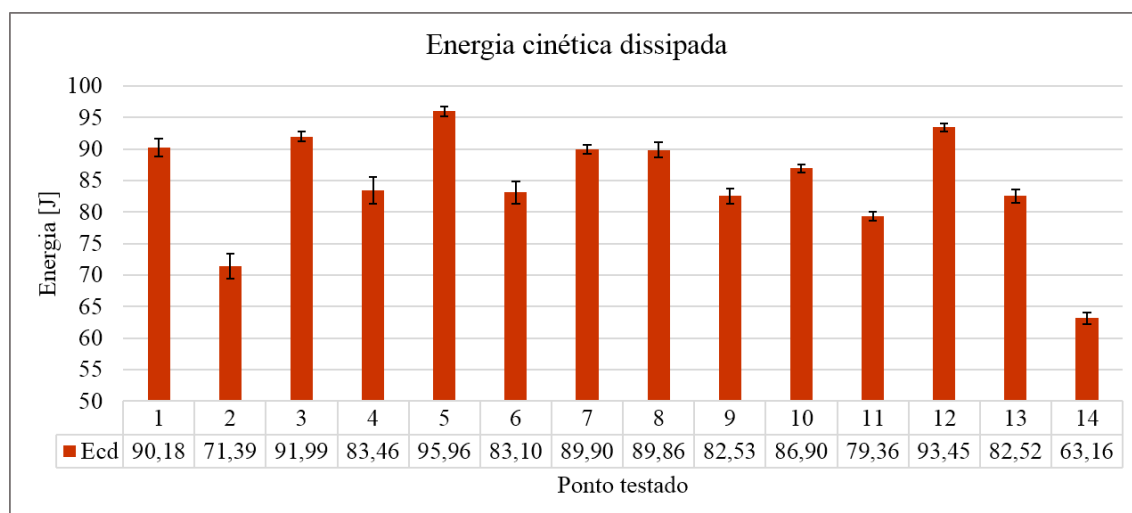


Figura 5.20-Energia cinética dissipada média (calculada com expressão (5.9) e (5.10) ) e intervalo de confiança para cada ponto testado.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores de energia cinética retornada e dissipada sob a forma de percentagem. Quanto menor a percentagem de energia que é retornada ao impactor, menor será a altura de ressalto atingida pelo impactor.

Tabela 5.5-Energia cinética retornada e dissipada (%).

Energia cinética (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Retornada (final)	44,5	56,5	42,5	49,4	39,2	48,0	42,1	42,1	47,0	44,5	49,0	40,7	47,4	59,5
Dissipada	55,5	43,5	57,5	50,6	60,8	52,0	57,9	57,9	53,0	55,5	51,0	59,3	52,6	40,5

Cálculo da altura teórica de ressalto

Determinou-se a altura de ressalto teórica a partir de dois métodos; o primeiro consistiu na aplicação da lei da conservação de energia, considerando o intervalo em que o impactor está sujeito apenas à aceleração gravítica e, portanto, não existem forças dissipativas a atuar no sistema.

Assim, a variação da energia mecânica (2.20) entre os dois pontos, instante em que o impactor abandona o praticável e o instante onde se atinge a altura máxima de ressalto, é nula e a equação (2.20) é simplificada na expressão (5.11).

---


$$\frac{1}{2}mv_f^2 = m \times g \times \Delta h \Leftrightarrow \Delta h = \frac{0,5 v_f^2}{g} \quad (5.11)$$


---

A velocidade final referida na expressão (5.11) é a velocidade de ressalto que já foi apresentada em secções anteriores.

O segundo método utilizado para o cálculo da altura teórica de ressalto consistiu na utilização da expressão (3.7), que relaciona a altura de queda e a altura de ressalto com o COR. Considerou-se a altura inicial 800 mm, que é a altura de queda para cada ensaio realizado.

O gráfico da Figura 5.21 é relativo aos valores médios da altura de ressalto experimental e teórica (pelos dois métodos apresentados anteriormente) e o respetivo intervalo de confiança.

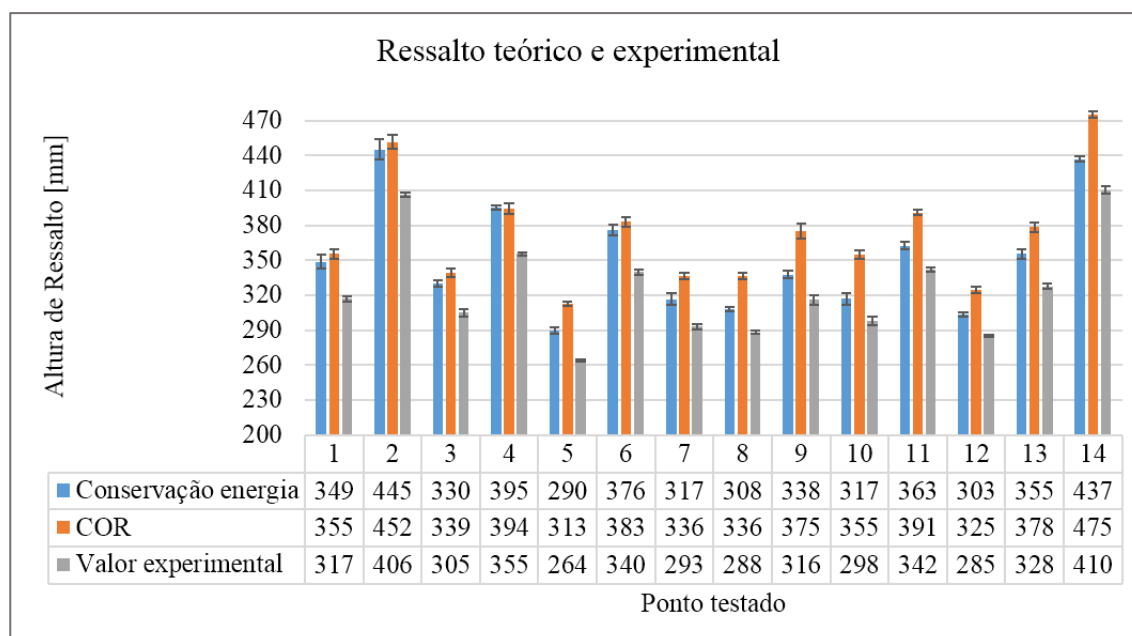


Figura 5.21-Altura de ressalto média ,experimental e teórica (2 métodos distintos) e respetivo intervalo de confiança para todos os pontos testados.

Da análise do gráfico da Figura 5.21 verifica-se que os valores médios de ressalto teórico obtidos pelas duas metodologias, são superiores ao valor experimental médio obtido para cada ponto.

Essas diferenças podem ser explicadas considerando que as duas metodologias utilizadas para o cálculo da altura teórica de ressalto dependem da velocidade do impactor antes e após o impacto e, portanto, o método de obtenção destas variáveis pode induzir erros no cálculo dos valores teóricos. Inicialmente essas variáveis foram calculadas considerando a interceção com o plano base medido experimentalmente.

Contudo, durante esta dissertação, analisando o trabalho realizado pela força de impacto ao longo do impacto, verificou-se que é possível encontrar o intervalo temporal em que existe contacto entre o impactor e o praticável e, portanto, calcular a velocidade antes e após do impacto através deste método.

### 5.1.2 Resultados obtidos

Na Tabela 5.6 encontra-se informação relativa à média e desvio padrão das variáveis medidas (deflexão, altura ressalto e força impacto máxima) para cada um dos pontos testados e respetiva média global. Os valores apresentados foram obtidos de acordo com os métodos de cálculo constantes na norma utilizada [3].

Tabela 5.6-Tabela síntese com a média e desvio padrão (DP) dos parâmetros medidos para a 1ª série de ensaios, deflexão máxima [mm], ressalto máximo [mm], força máxima de impacto [N].

<b>Ponto</b>	<b>Deflexão máxima [mm]</b>	<b>DP</b>	<b>Ressalto máximo [mm]</b>	<b>DP</b>	<b>Força de impacto máxima (célula) [N]</b>	<b>DP</b>	<b>Força impacto máxima (encoder) [N]</b>	<b>DP</b>
<b>1</b>	92	0,48	317	3	3257	41	3177	115
<b>2</b>	88	1,37	406	2	3194	59	3278	91
<b>3</b>	79	0,71	305	5	3448	77	3425	60
<b>4</b>	87	0,44	355	2	3169	7	3258	87
<b>5</b>	85	0,44	264	1	3715	84	3670	122
<b>6</b>	80	0,47	340	3	3429	22	3695	217
<b>7</b>	88	0,27	293	3	2875	16	2868	65
<b>8</b>	80	0,08	288	1	3875	9	3715	37
<b>9</b>	84	0,62	316	6	3069	25	3026	107
<b>10</b>	81	0,50	298	5	3495	36	3421	40
<b>11</b>	82	0,38	342	2	3216	14	3126	77
<b>12</b>	80	0,28	285	1	3535	21	3473	62
<b>13</b>	87	0,45	328	3	3286	42	3250	64
<b>14</b>	82	0,25	410	4	3156	37	3252	61
<b>Média</b>	<b>84</b>	<b>0,5</b>	<b>325</b>	<b>3</b>	<b>3337</b>	<b>35</b>	<b>3331</b>	<b>86</b>



Comparando os resultados obtidos com os limites presentes na Tabela 1.2, verifica-se que, apesar dos valores médios globais de ressalto máximo e força máxima estarem dentro do permitido pela norma, o valor médio global da deflexão é bastante superior.

Os valores médios de deflexão para cada ponto também são bastante superiores, pelo que se torna necessário encontrar uma nova solução construtiva que permita diminuí-los de uma forma geral.

## **5.2 2ª SÉRIE DE ENSAIOS: ENSAIOS EXPERIMENTAIS NAS AMOSTRAS DO TIPO 2**

Como foi referido anteriormente, pretendia-se com a 2ª série de ensaios avaliar a influência que a adição de mais uma camada de espuma polimérica teria no comportamento da solução construtiva global.

Desta forma, foram reunidos um conjunto de parâmetros com o propósito de realizar uma comparação entre a solução original (1ª série de ensaios) e a nova solução proposta.

Realizaram-se um menor número de repetições (5 em vez de 10) e não foram testados todos os pontos, isto porque de acordo com a informação recolhida até ao momento, era esperado que a adição de mais espuma promovesse um aumento do afundamento máximo permitido pelo praticável, e, portanto, se a 1ª solução já apresentava uma deformação máxima (84 mm) acima do permitido (segundo a norma era 75 mm), nesta segunda série esse valor seria possivelmente superado.

Na Tabela 5.7 da secção 5.2.1 encontram-se os valores relativos à deformação máxima, ao ressalto máximo e à força de impacto máxima (medida através da célula de carga e calculada com base na aceleração máxima medida pelo *encoder*) para a 2ª série experimental e que, juntamente com os valores médios obtidos para a 1ª série, foram utilizados para a construção dos gráficos de barras apresentados de seguida (gráfico da Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25).

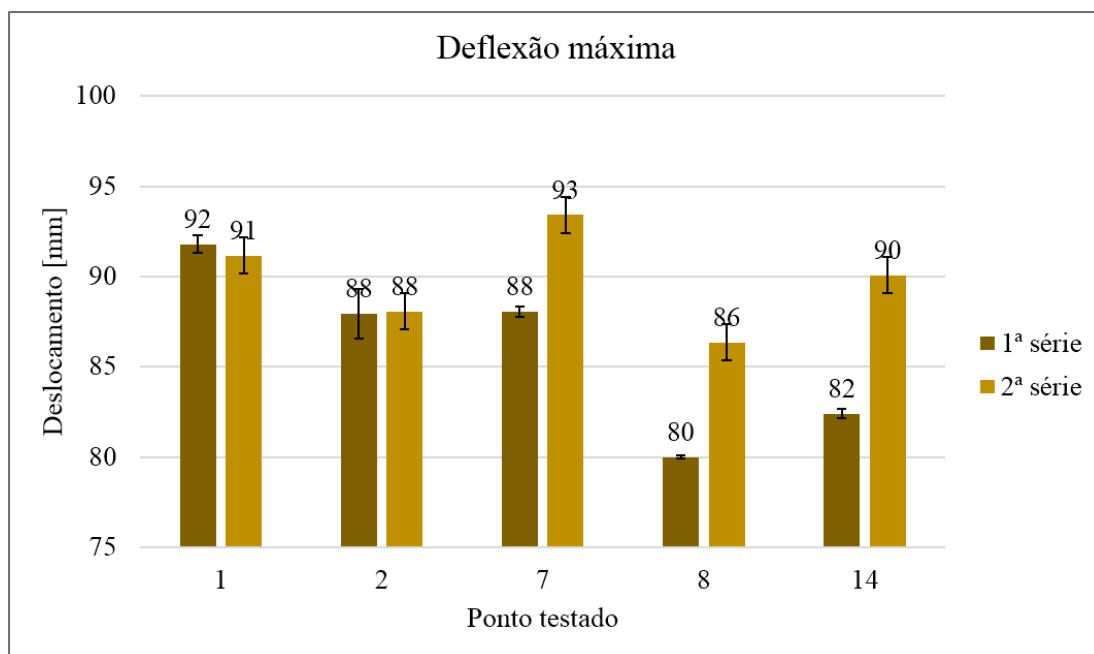


Figura 5.22- Deflexão máxima média e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios.

De acordo com a informação presente no gráfico da Figura 5.22, os valores de deformação aumentaram de uma forma geral relativamente à primeira série, especialmente se considerarmos o valor médio para os pontos 7, 8 e 14.

O impactor foi desacelerado durante uma distância maior e, portanto, a energia potencial armazenada no praticável também é maior, contudo segundo os dados presentes no gráfico da Figura 5.23, o ressalto máximo diminuiu ligeiramente (e não aumenta), mesmo para os pontos onde se tinha verificado um aumento mais significativo da deformação.

Este facto é explicável se considerarmos dois fatores importantes que já foram referidos anteriormente, o primeiro é que é necessário que exista uma força de contacto para que ocorra deformação, contudo a parcela de energia que é armazenada no sistema depende das propriedades do material, a segunda relaciona-se com a parcela de energia que é dissipada pelo praticável, e, portanto, nem toda a energia armazenada pelo sistema é transferida de volta ao impactor.

Ao aumentar-se o número de camadas, aumentou-se a energia armazenada (devido ao aumento da deformação), contudo também se aumentou a parcela de energia absorvida pelo sistema. As propriedades viscoelásticas da espuma polimérica utilizada no fabrico do protótipo promovem a absorção da energia.

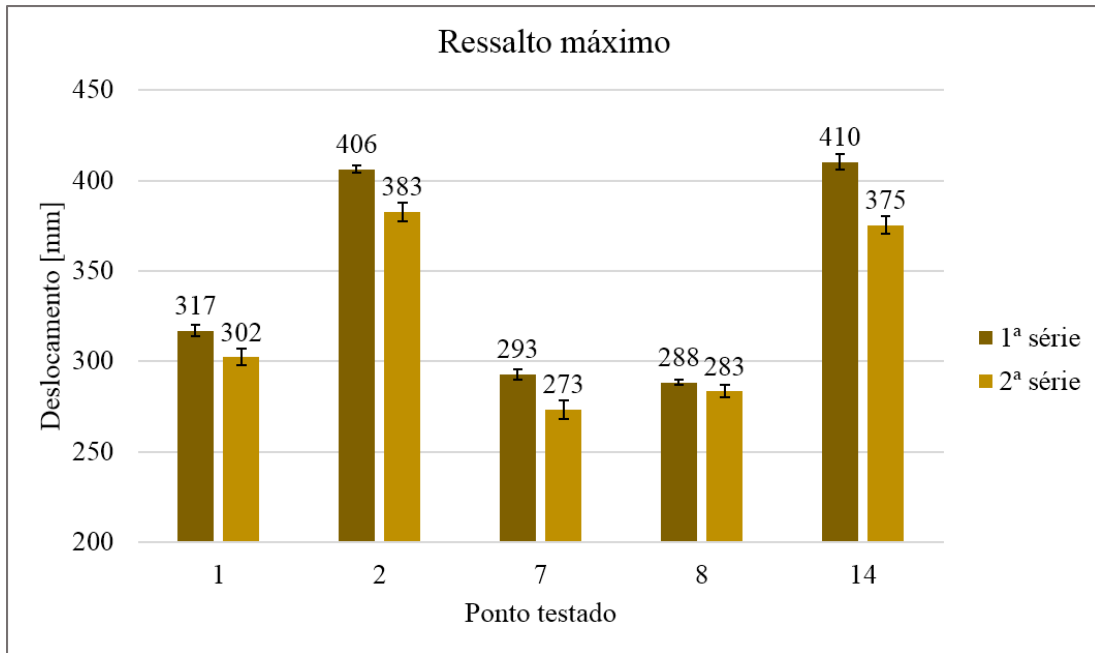


Figura 5.23-Ressalto máximo médio e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios.

Nos gráficos da Figura 5.24 e Figura 5.25 estão representados os valores médios e intervalo de confiança para a força de impacto máxima obtida durante a 1ª e 2ª série experimental para os pontos 1, 2, 7, 8 e 14.

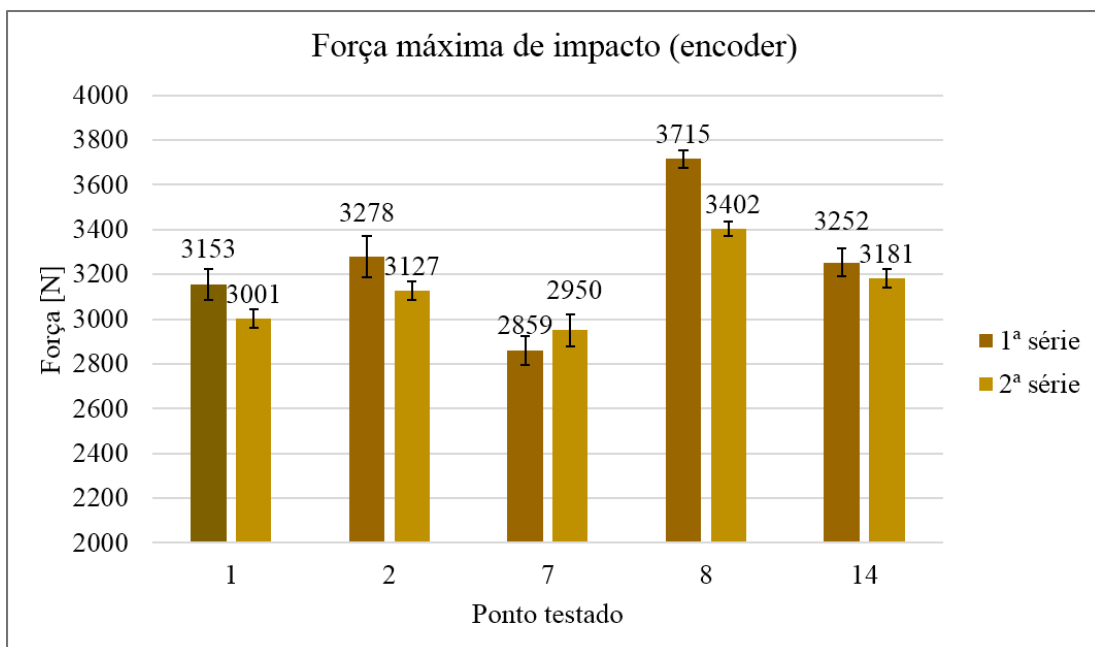


Figura 5.24- Força máxima de impacto (via *encoder*) média e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios experimentais.

O 1º gráfico diz respeito aos valores obtidos através do *encoder* e o 2º relativamente aos medidos através da célula de carga. A adição de mais camadas de espuma polimérica foi responsável pela redução da força máxima sentida durante a 2ª série comparativamente ao 1ª.

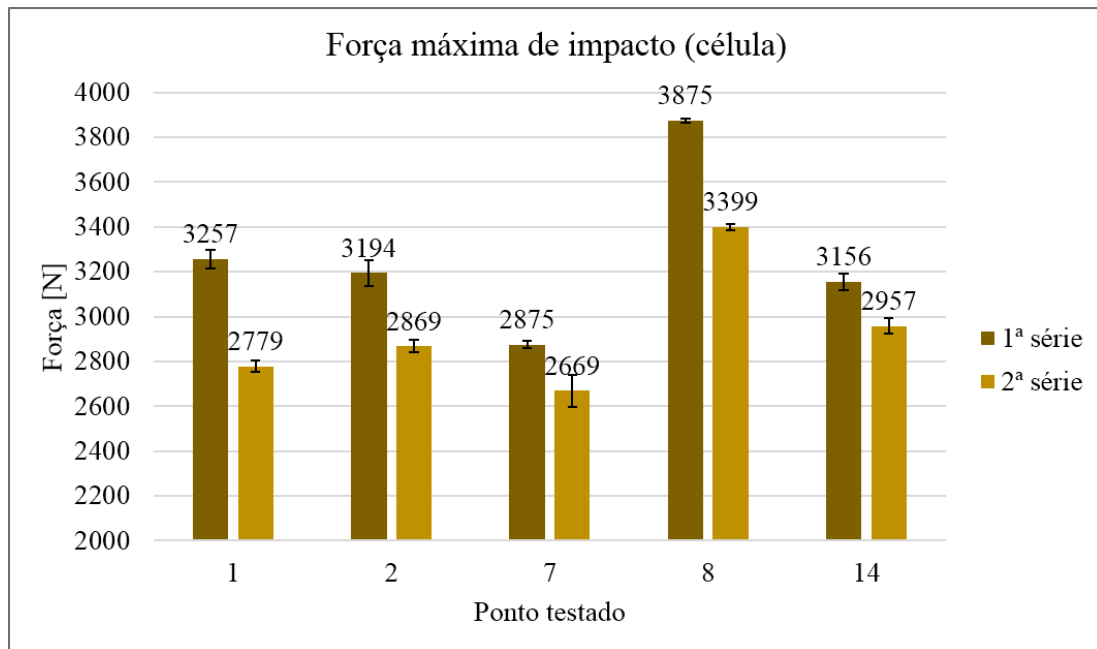


Figura 5.25-Força máxima de impacto (célula) média e intervalo de confiança para a 1ª e 2ª série de ensaios experimentais.

Esta tendência foi justificada recorrendo à definição física de impulso que já foi descrita anteriormente (secção 2.2.2), assim, as forças de interação que ocorrem durante a colisão dependem não apenas das condições iniciais e finais, mas também das propriedades físicas dos objetos que colidem. Ao aumentar o número de camadas do praticável, aumentou-se a elasticidade do sistema e, portanto, o tempo de colisão é maior e as forças envolvidas menores.

### 5.2.1 Resultados obtidos

Na Tabela 5.7 encontra-se informação relativa à média e desvio padrão das variáveis medidas (deflexão, altura ressalto e força impacto máxima) para cada um dos pontos testados e respetiva média global. Os valores apresentados foram obtidos de acordo com os métodos de cálculo constantes na norma utilizada [3].

Tabela 5.7-Tabela síntese com a média e desvio padrão (DP) dos parâmetros a medir para a 2ª série de ensaios, deflexão máxima [mm], ressalto máximo [mm], força máxima de impacto [N].

<b>Ponto</b>	<b>Deflexão máxima [mm]</b>	<b>DP</b>	<b>Ressalto máximo [mm]</b>	<b>DP</b>	<b>Força de impacto máxima (célula) [N]</b>	<b>DP</b>	<b>Força impacto máxima (encoder) [N]</b>	<b>DP</b>
1	91	0,77	302	4	2779	23	3001	41
2	88	0,95	383	5	2869	27	3127	42
7	93	1,78	273	5	2669	72	2950	71
8	86	0,78	283	4	3399	15	3402	33
14	90	1,14	375	5	2957	35	3181	40
<b>Média</b>	<b>90</b>	<b>1</b>	<b>323</b>	<b>5</b>	<b>2934</b>	<b>34</b>	<b>3132</b>	<b>45</b>

Comparando com os valores da Tabela 1.2, verifica-se que apesar dos valores médios de ressalto máximo e força máxima estarem dentro do permitido pela norma, o valor médio da deflexão é bastante superior. Relativamente à primeira solução, verificou-se que a deflexão média global nos ensaios da segunda série aumentou cerca de 5 mm.

### 5.3 3ª SÉRIE DE ENSAIOS: ENSAIOS EXPERIMENTAIS NAS AMOSTRAS DO TIPO 3

A realização da 3ª série de ensaios surgiu com o objetivo de avaliar a influência que o aumento da rigidez da estrutura do praticável, nomeadamente através do incremento da espessura do estrado de madeira teria no comportamento da solução construtiva global. O conjunto de parâmetros utilizados para a série experimental anterior foi utilizado com o propósito de efetuar uma confrontação entre a solução original (tipologia 1) e a nova solução proposta (tipologia 3).

Comparativamente à 1ª série de ensaios, para a 3ª série era expectável que o aumento da espessura do estrado de madeira promovesse uma diminuição do afundamento máximo permitido pelo praticável, consequência do aumento da resistência deste à deformação. Através da análise da Figura 5.26 verifica-se que o aumento da espessura do “elemento rígido” do sistema resultou na diminuição da deflexão da solução construtiva global, como era esperado.

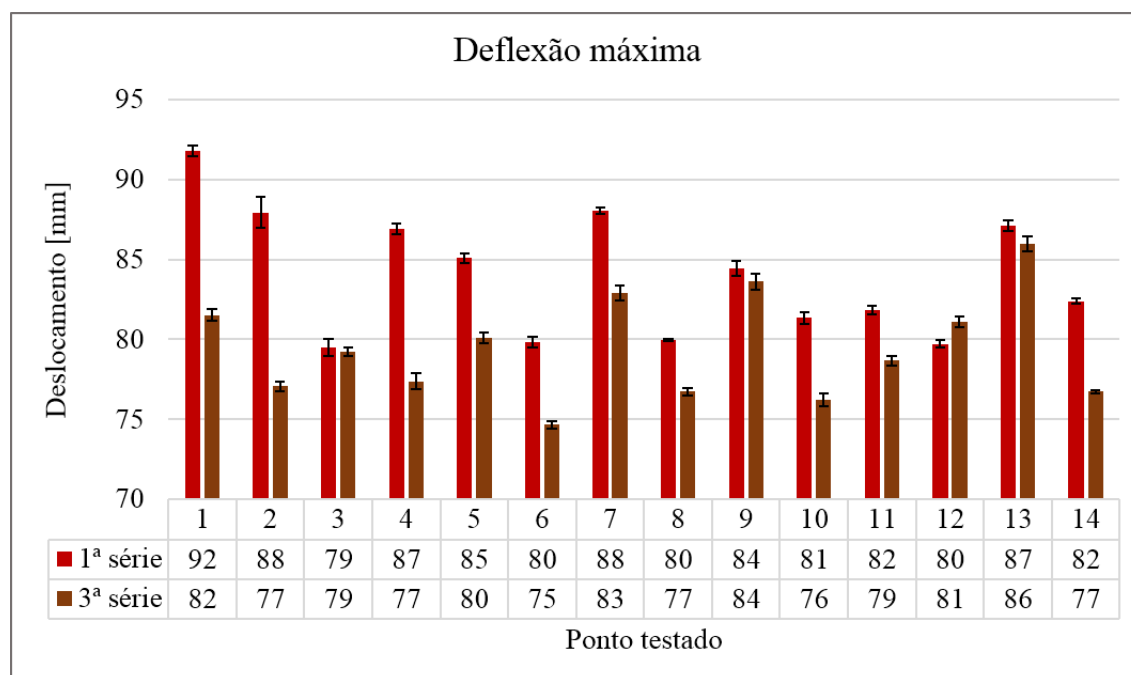


Figura 5.26-Deflexão máxima média e intervalo de confiança para 1ª e 3ª série de ensaios.

Evidentemente que com a diminuição da deflexão máxima do praticável, também a energia armazenada pela amostra será menor, considerando que a espessura da camada de espuma se mantém constante entre a 1ª e a 3ª série de ensaios. Se a energia armazenada pela solução é menor, espera-se que a altura de ressalto máxima atingida pelo impactor também seja menor. Esse facto pode ser verificado através da análise da Figura 5.27 .

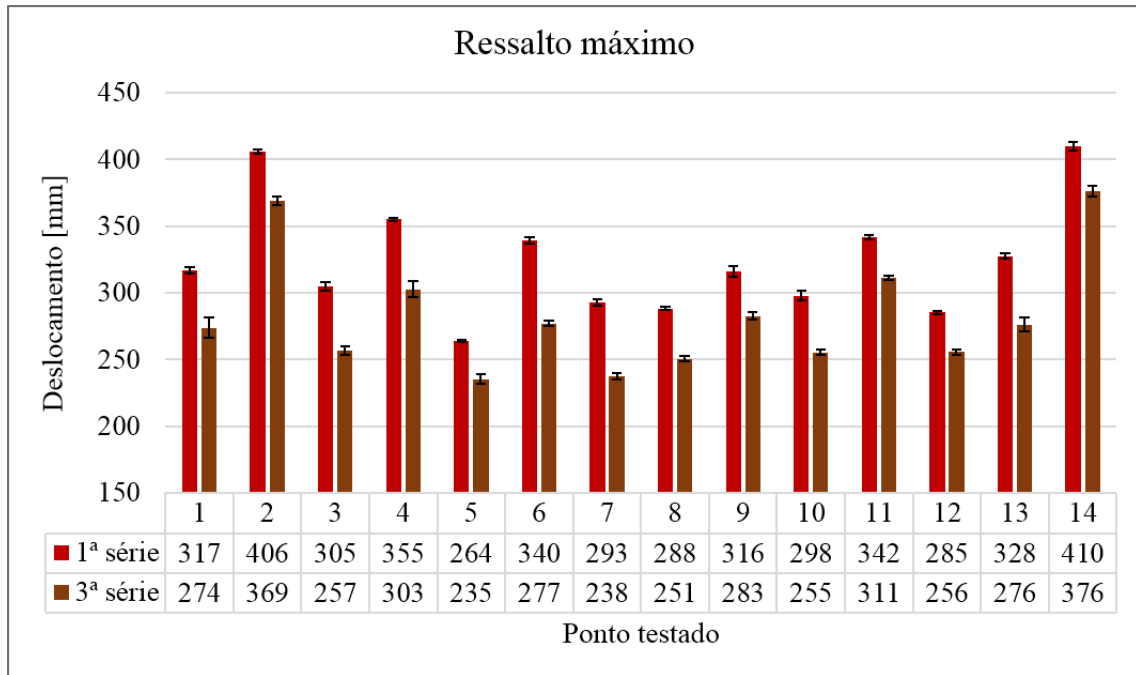


Figura 5.27-Ressalto máximo médio e intervalo de confiança para 1ª e 3ª série de ensaios.

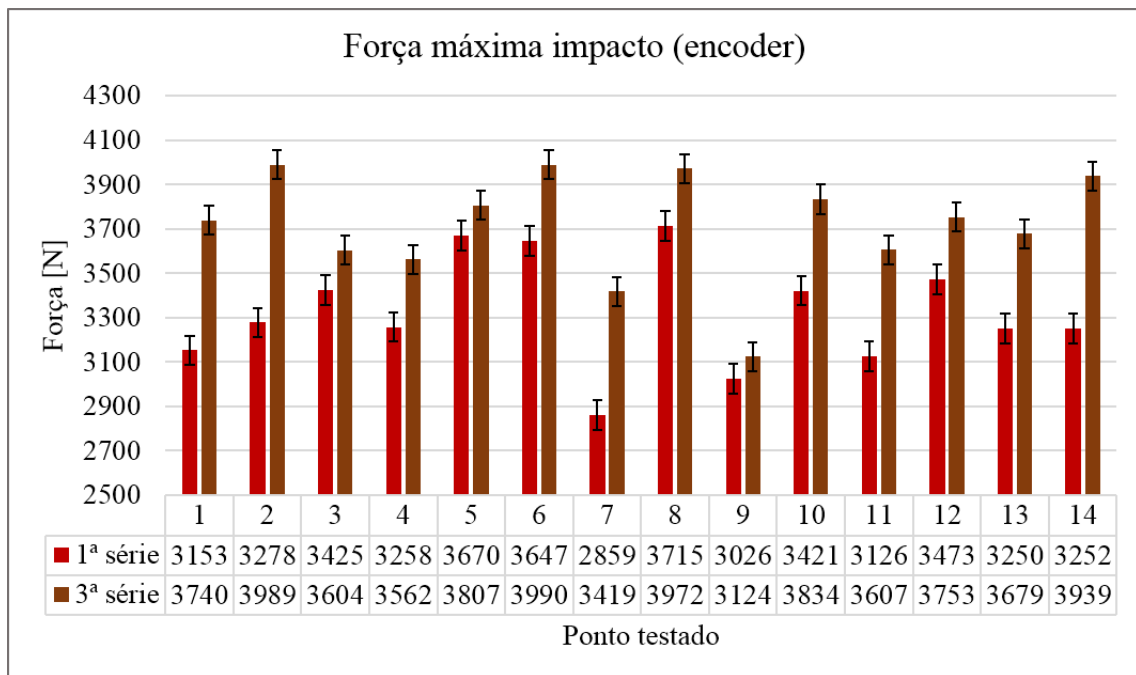


Figura 5.28-Força máxima de impacto (via *encoder*) média e intervalo de confiança para a 1ª e 3ª série de ensaios experimentais.

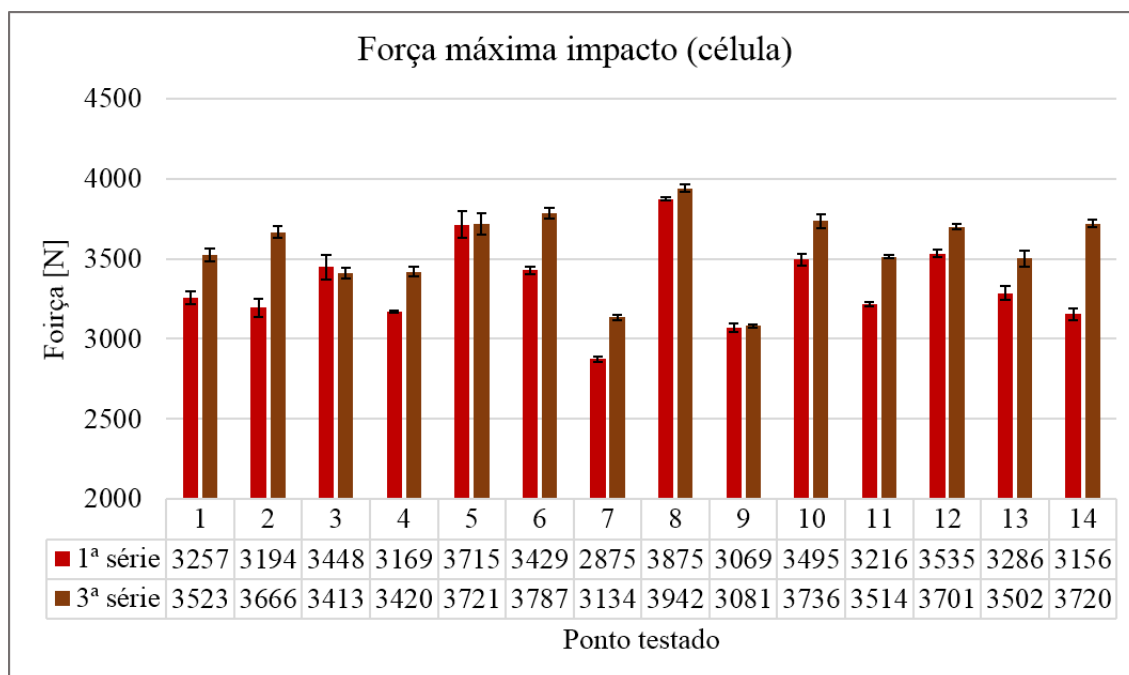


Figura 5.29-Força máxima de impacto (via célula de carga) média e intervalo de confiança para a 1ª e 3ª série de ensaios experimentais.

Relativamente à 1ª série de ensaios, na 3ª a força máxima de impacto aumentou com o aumento da espessura do estrado de madeira, ou seja, com o aumento da rigidez também aumentou a força necessária para que ocorra deformação, facto que já era esperado.

Importa referir que cada ponto testado tem características diferentes que afetam o comportamento global da solução proposta. Aspetos como a disposição das molas ao longo da amostra, a anisotropia associada à espuma polimérica utilizada no fabrico dos praticáveis podem justificar alguns resultados menos esperados.

Por outro lado, já foi discutido anteriormente a influência que a rigidez e a deflexão têm no armazenamento de energia, sendo que o segundo fator têm maior influência (pois é afetado quadraticamente) que o primeiro e, portanto, é normal que os resultados para a 1ª/3ª série não apresentem uma diferença tão visível comparativamente à 1ª/2ª série.



### 5.3.1 Resultados obtidos

Na Tabela 5.8 encontra-se informação relativa à média e desvio padrão das variáveis medidas (deflexão, altura ressalto e força impacto máxima) para cada um dos pontos testados e respetiva média global. Os valores apresentados foram obtidos de acordo com os métodos de cálculo constantes na norma utilizada [3].

Tabela 5.8-Tabela síntese com a média e desvio padrão dos parâmetros a medir para a 3ª série de ensaios, deflexão máxima [mm], ressalto máximo [mm], força máxima de impacto [N].

<b>Ponto</b>	<b>Deflexão máxima [mm]</b>	<b>DP</b>	<b>Ressalto máximo [mm]</b>	<b>DP</b>	<b>Força impacto máxima (célula) [N]</b>	<b>DP</b>	<b>Força impacto máxima (encoder) [N]</b>	<b>DP</b>
1	82	0,53	274	8	3523	39	3740	67
2	77	0,45	369	3	3666	37	3989	72
3	79	0,40	257	3	3413	34	3604	67
4	77	0,70	303	6	3420	30	3562	62
5	80	0,49	235	4	3721	66	3807	105
6	75	0,33	277	2	3787	33	3990	45
7	83	0,67	238	2	3134	19	3419	60
8	77	0,29	251	2	3942	21	3972	29
9	84	0,67	283	2	3081	9	3124	43
10	76	0,56	255	2	3736	43	3834	99
11	79	0,43	311	2	3514	10	3607	57
12	81	0,45	256	2	3701	19	3753	60
13	86	0,65	276	5	3502	49	3679	95
14	77	0,16	376	4	3720	24	3939	68
<b>Média</b>	<b>79</b>	<b>0,5</b>	<b>283</b>	<b>3</b>	<b>3561</b>	<b>31</b>	<b>3716</b>	<b>66</b>

Comparando os resultados obtidos com os limites presentes na Tabela 1.2, verifica-se que apesar dos valores médios globais de ressalto máximo e força máxima estarem dentro do permitido pela norma, o valor médio global da deflexão não está, contudo apresenta um valor mais próximo do desejado (75 mm) do que qualquer uma das soluções anteriores.

Contudo, importa salientar que a força máxima de impacto para a 3ª série aumentou comparativamente à primeira série, o que pode não ser vantajoso para a segurança dos utilizadores, se o valor se aproximar muito do estabelecido na norma FIG.

---

# *CAPÍTULO 6*

---



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

Foram executados ensaios de impacto em três amostras diferentes de praticáveis de ginástica artística. Apesar da altura máxima de ressalto e da força máxima de impacto, para todas as amostras, se encontrarem de acordo com as diretivas em vigor, a deflexão máxima é superior ao permitido, pelo que nenhuma das soluções é passível de homologação.

Na 3ª amostra, contudo, o valor médio de deflexão (79 mm) é pouco superior ao permitido pela norma (75 mm). Contudo, o aumento da rigidez na 3ª amostra relativamente à 1ª amostra conduziu a um aumento da força máxima de impacto, o que pode ser prejudicial do ponto de vista da segurança dos utilizadores.

Verificou-se que é possível calcular o valor da força máxima de impacto com base nos dados de deslocamento do *encoder*, através de dois métodos distintos e após a aplicação de um filtro *butterworth*.

Um dos métodos utilizados para o cálculo da força, foi a aplicação do teorema energia-trabalho, a partir do qual se concluiu que foi possível encontrar o intervalo onde ocorre o contacto do impactor com o praticável, sem depender da medição do plano base.

A criação de rotinas para o processamento de dados experimentais foi um passo importante, pois permitiu realizar um tratamento de dados mais vasto e de forma mais eficiente.

Naturalmente, este não é um trabalho terminado. Será interessante, por exemplo, a título de trabalhos futuros:

- Procurar uma solução de estrado, em termos de material ou geometria diferentes, de forma a cumprir a norma;
- Modelação numérica do processo como ferramenta de resposta à questão anterior;
- Agilização do método de tratamento de dados;
- Obter o deslocamento a partir dos dados de aceleração média recolhidos pela célula de carga.



## 7 BIBLIOGRAFIA

---

- [1] F. Pereira, “Construção e teste de praticável de ginástica artística e rítmica”, Universidade de Aveiro, 2016.
- [2] B. M. Nigg, B. R. MacIntosh, e J. Mester, “Work and Energy Influenced by Athletic Equipment” in *Biomechanics and Biology of Movement*, 1ª Edition., Wiley: Human Kinetics, 2000, pp. 49–67.
- [3] “Apparatus Norms IV-Testing procedures.” [Online]. Available: [http://www.fig-gymnastics.com/publicdir/rules/files/app-norms/Norms\\_IV\\_E\\_2016.pdf](http://www.fig-gymnastics.com/publicdir/rules/files/app-norms/Norms_IV_E_2016.pdf). [Accessed: 20-Dec-2016].
- [4] A. Lima, “Aperfeiçoamento de máquina de ensaios de impacto”, Universidade de Aveiro, 2016.
- [5] I. Karacsony e I. Cuk, “Floor exercises: methods, ideas, curiosities, history”, Press, Ljubljana: University of Ljubljana, 2005, p. 102.
- [6] M. A. C. Bortoleto e T. F. Coelho, “Mens artistic gymnastics: is the use of elastic surfaces systematic in the training process?”, *Rev. Bras. Educ. Física e Esporte, São Paulo*, vol. 30, no. 1, pp. 51–59, 2016.
- [7] P. Pérez, S. Llana, e E. Alcántara, “Standard tests ability to measure impact forces reduction on mats”, *Int. J. Sport. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 162–168, 2008.
- [8] W. A. Sands *et al.*, “Kinematic and Kinetic Tumbling Take-Off Comparisons of a Spring-Floor and an Air Floor (TM) : A Pilot Study”, *Sci. Gymnast. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 31–46, 2013.
- [9] W. A. Sands, B. Alumbaugh, J. R. Mcneal, S. Ross, e M. H. Stone, “Comparison of floor exercise apparatus spring-types on a gymnastics rearward tumbling take-off”, vol. 6, no. 2, pp. 41–51.
- [10] S. Begley e A. Rogers, “How high? How fast?”, *newsweek*, pp. 22–34, 1996.
- [11] “Apparatus Norms.” [Online]. Available: [http://www.fig-gymnastics.com/publicdir/rules/files/app-norms/Apparatus Norms I-III E- Version 2017-e\\_.pdf](http://www.fig-gymnastics.com/publicdir/rules/files/app-norms/Apparatus Norms I-III E- Version 2017-e_.pdf). [Accessed: 20-Dec-2016].
- [12] j. O. Vern and J. B. Donald, *Inquiry into Physics*, 6th ed. Brookes-Cole, 2007.
- [13] P. Grimshaw e A. Burden, *Instant Notes for Sport and Exercise Biomechanics*. 2007.
- [14] “Nonconservative Forces.” [Online]. Available: <http://archive.cnx.org/contents/503da998-00c5-4af7-8f5a-386f08ac6ec9@1/nonconservative-forces>. [Accessed: 13-Dec-2016].
- [15] D. J. Stefanyshyn and B. M. Nigg, “Energy and Performance Aspects in Sport Surfaces,” in *Sport Surfaces – Biomechanics, Injuries, Performance, Testing and Installation*, Calgary :

- University Of Calgary, Human Performance Laboratory, 2003, pp. 31–46.
- [16] G. Baroud, B. M. Nigg, and D. Stefanyshyn, “Energy storage and return in sport surfaces,” *Sport. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 173–180, 1999.
- [17] “Position transducer.” [Online]. Available: <https://www.spaceagecontrol.com/s004a.htm>. [Accessed: 15-Nov-2016].
- [18] “Suporte técnico National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/pt-pt/support.html>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [19] “VBA Excel add-in utilities and worksheet templates.” [Online]. Available: <https://www.uantwerpen.be/en/staff/sam-vanwassenbergh/my-website/excel-vba-tools/>. [Accessed: 04-Dec-2016].



---

# *ANEXOS*

---



## 8 ANEXOS

### 8.1 ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS: MÉTODOS NUMÉRICOS [13]

Para a aplicação destes métodos é importante conhecer o comportamento da função que define o sistema ou ter um conjunto de dados experimentais e conhecer as condições fronteira do sistema.

#### 8.1.1 Diferenciação numérica: Método das diferenças finitas

A diferenciação numérica é o nome dado a um método de cálculo da taxa de variação de uma variável em função de outra, normalmente o tempo. O método das diferenças finitas é frequentemente utilizado em engenharia e é um método de aproximação numérico bastante simples de aplicar.

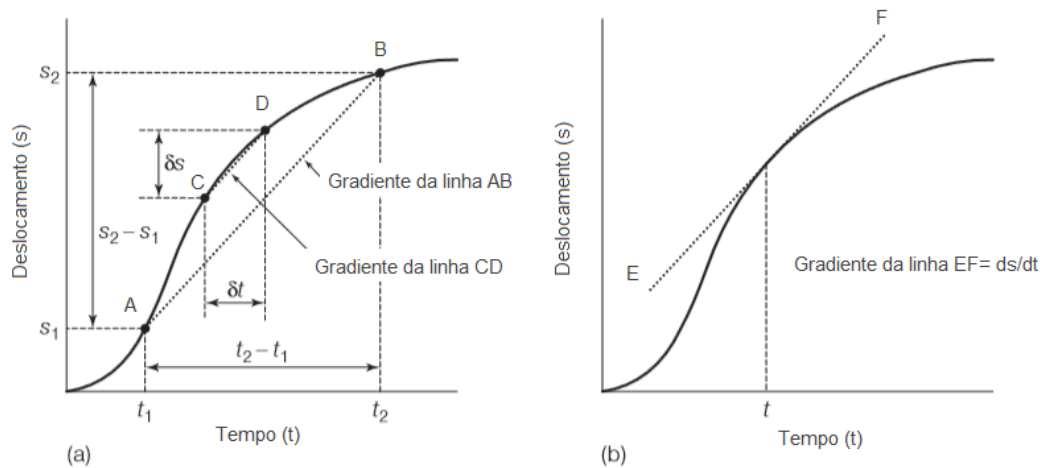


Figura 8.1-Illustração de como o gradiente entre dois pontos se transforma na reta tangente ao ponto, se considerarmos a diferença entre os dois pontos a analisar nula. Adaptado de [13].

Considerando um intervalo de tempo suficientemente pequeno (como é o caso em estudo  $1/25000 = 0.00004$  s), é possível fazer uma estimativa dos valores da velocidade e aceleração instantânea com base na definição de velocidade (8.1) e aceleração (8.2) média entre dois pontos, sendo  $i$  o incremento.

$v = \frac{s_{i+1} - s_i}{t_{i+1} - t_i}$	(8.1)
$a = \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i}$	(8.2)

## 8.2 MACROS UTILIZADAS PARA O TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Nesta secção faz-se a descrição e análise dos programas utilizados para o processamento dos dados experimentais obtidos através NI MAX. As rotinas desenvolvidas serviram essencialmente para processar os três tipos de ficheiros adquiridos após os ensaios experimentais e que são:

- Os ficheiros “**i.j encoder.xlsx**” (i é o ponto em análise e j é o número do ensaio) com a posição do impactor ao longo do tempo;
- Os ficheiros “**i.j célula.xlsx**” com a força medida ao longo do tempo;
- Os ficheiros “**i.0 encoder.xlsx**”, um por cada ponto ensaiado, cuja posição do impactor é aproximadamente constante ao longo do tempo (medição do plano base).

Criou-se o ficheiro *MS Excel*<sup>®</sup> “**Resultados.xlsx**”, para cada uma das amostras testadas, onde se integra toda a informação relevante de ambos os sensores, para todos os pontos testados e de acordo com o número de repetições realizadas.

Esta secção contém, além de figuras com os programas utilizados, imagens das folhas *MS Excel*<sup>®</sup> dos ficheiros processados para facilitar a explicação de alguns conceitos.

Todas as imagens utilizadas nesta secção são relativas à primeira amostra testada e ao 6º ensaio para o 4º ponto ensaiado. Contudo estas rotinas foram aplicadas a todos os ficheiros recolhidos durante os ensaios das três amostras.

As macros apresentadas estão comentadas, de forma a facilitar a sua análise.

A macro *encoder* que se encontra na Figura 8.2 foi estruturada para processar os dados relativos ao *encoder* (ficheiros “i.j *encoder.xlsx*”). Dividiu-se esta macro em 4 partes para simplificar a sua discussão ao longo desta secção.

```

Sub Encoder()
'Pré-Processamento
'A primeira folha denomina-se Originais
If Sheets.Count <= 1 Then
  ActiveSheet.Name = "Originais"
  'Conversão para unidades SI
  Call Module1.Conversão
  'Segmentação da zona de interesse em estudo
  Call Module1.extremos
  Columns("A:N").HorizontalAlignment = xlCenter
  Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
End If
'Aplicação do Filtro Butterworth
'A segunda folha denomina-se Dados
If Sheets.Count <= 2 Then
  ActiveSheet.Name = "Dados"
  Cells(1, 1) = "[s]"
  Cells(2, 1) = "time"
  Cells(1, 2) = "[m]"
  Cells(2, 2) = "data"
  Cells(1, 3) = 80
  Cells(2, 3) = "butfilt1"
  Cells(2, 4) = "velocity"
  Cells(2, 5) = "acceleration"
  intervalo = Sheets("Originais").Cells(4, 14)
  a = Sheets("Originais").Cells(4, 8)
  b = Sheets("Originais").Cells(4, 13)
  ' Copia a coluna do tempo e do deslocamento da folha Originais para a Dados
For col = 1 To 3 Step 2
  Sheets("Originais").Activate
  Range(Cells(a, col), Cells(b, col)).Select
  Selection.Copy
  Sheets("Dados").Activate
  'Define a coluna onde será colada a informação na folha Dados
  If col = 3 Then
    Range(Cells(3, col - 1), Cells(intervalo + 3, col - 1)).Select
  ElseIf col = 1 Then
    Range(Cells(3, col), Cells(intervalo + 3, col)).Select
  End If
  ActiveSheet.Paste
  Application.CutCopyMode = False
Next
'Executa o filtro Butterworth
Application.Run "butfilter"
'Cálculo do deslocamento máximo e mínimo, da velocidade máxima e mínima
'e da aceleração máxima
Call Module1.limites
Columns("A:L").HorizontalAlignment = xlCenter
Columns("A:L").ColumnWidth = 11
Call Module1.GraficoDesl
  Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
End If

```

Figura 8.2-Macro “*encoder*” para o processamento dos dados relativos ao deslocamento (continua na próxima página).

```

' Obtenção dos 2 gráficos na zona de deslocamento mínimo e máximo
Dim strmin As String
For i = 1 To 2
    If i = 1 Then
        a = "Minimo"
        am = Sheets("Dados").Cells(6, 7) - 200
        bm = Sheets("Dados").Cells(6, 7) + 200
    ElseIf i = 2 Then
        a = "Maximo"
        am = Sheets("Dados").Cells(6, 8) - 200
        bm = Sheets("Dados").Cells(6, 8) + 200
    End If
    strm = "A" & CStr(am) & ":" & "C" & CStr(bm)
    'A terceira folha denomina-se Minimo
    'A quarta folha denomina-se Maximo
    If Sheets.Count <= 2 + i Then
        ActiveSheet.Name = a
        Worksheets("Dados").Range("A1:C2").Copy _
        Destination:=Worksheets(a).Range("A1:C2")
        Worksheets("Dados").Range(strm).Copy _
        Destination:=Worksheets(a).Range("A3:C203")
        Cells(1, 3) = Cells(1, 2)
        'Criação do gráfico
        Call Module1.GraficoDes1
    End If
    Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
Next
End If

```

Parte 3

```

If Sheets.Count <= 5 Then
    'A quinta folha denomina-se Tratamento
    ActiveSheet.Name = "Tratamento"
    Sheets("Dados").Activate
    ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
    str1 = "A1" & ":" & "C" & CStr(ult)
    'Copiar as 3 primeiras colunas da folha dados
    Worksheets("Dados").Range(str1).Copy _
    Destination:=Worksheets("Tratamento").Range(str1)
    Sheets("Tratamento").Activate
    Columns(2).Value = ""
    Cells(1, 3) = "[m]"
    Cells(1, 2) = "[m]"
    Cells(2, 2) = "zero"
End If
End Sub

```

Parte 4

Figura 8.2-Continuação.

As secções que se seguem descrevem com maior detalhe o funcionamento desta macro.

Analisando a parte 1 da Figura 8.2 verifica-se que na primeira folha *Excel* denominada de “Originais”, que contém os dados de posição e tempo obtidos através do NI MAX foi aplicada a macro “Conversão” (secção 8.2.1) e a macro “extremos” (secção 8.2.2), estas duas rotinas serão analisadas nas secções que se seguem.

### 8.2.1 Conversão dos dados do NI MAX para Excel

A macro “Conversão” foi criada com o propósito de substituir os caracteres u, m, k que surgiam nos ficheiros *Excel* relativos ao *encoder* pelo valor numérico correspondente (0.0000001, 0.0001, 1000) (Figura 8.3). Esta macro foi reaproveitada para converter os valores de força de KN para N nos ficheiros relativos à célula de carga (Figura 8.3).

```
Sub Conversão()
col = 2
lin = 2
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
'Coluna onde serão escritos os valores convertidos
Cells(1, 3) = "data"
For i = lin To ult
    valor = Cells(i, col)
    S = Right(Left(valor, Len(valor)), 1)
    Cells(i, col + 1) = valor
    'Se não é numérico
    If IsNumeric(S) = False Then
        If S = "m" Then
            num = Left(valor, Len(valor) - 1)
            Cells(i, col + 1) = num * 0.001
        End If
        If S = "k" Then
            num = Left(valor, Len(valor) - 1)
            Cells(i, col + 1) = num * 1000
        End If
        If S = "u" Then
            num = Left(valor, Len(valor) - 1)
            Cells(i, col + 1) = num * 0.000001
        End If
    End If
    'Se é numérico, mantém o valor
    If IsNumeric(S) = True And Cells(1, 2).Value = "Amplitude- Force (Bridge)-Force" Then
        Cells(i, col + 1) = Cells(i, col).Value
    End If
    If IsNumeric(S) = True And Cells(1, 2).Value = "Amplitude - Voltage - Encoder" Then
        Cells(i, col + 1) = Cells(i, col).Value
    End If
Next
'Para os ficheiros relativos à célula de carga, conversão de KN para N
If ActiveSheet.Name <> "Força" Then
For i = lin To ult
Cells(i, col + 1).Value = Cells(i, col + 1).Value * 0.001
Next
End If
End Sub
```

Figura 8.3-Macro “Conversão” aplicada aos ficheiros *Excel* obtidos pelo *software NI Max*.

## 8.2.2 Seleção da zona de interesse com base nos dados do *encoder*

De forma a reduzir a quantidade de dados a processar recorreu-se à macro apresentada na Figura 8.4 para definição dos limites da zona de interesse.

```
Sub extremos()
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
'Minimo
pmin = WorksheetFunction.Min(Range("C:C"))
'Valor minimo na rampa
Min = WorksheetFunction.Min(Range("C2:C2000"))
Cells(1, 4) = "Diferença"
Cells(2, 7) = "Refer."
Cells(3, 7) = "[m]"
Cells(4, 7) = Min
Cells(2, 8) = "Limite 1"
Cells(3, 8) = "[idcelula]"
Cells(2, 9) = "Minimo"
Cells(3, 9) = "[m]"
Cells(4, 9) = pmin
Cells(5, 9) = "[idcelula]"
Cells(2, 10) = "Limite 2"
Cells(3, 10) = "[idcelula]"
Cells(2, 11) = "Maximo"
Cells(3, 11) = "[m]"
Cells(5, 11) = "[idcelula]"
Cells(2, 12) = "Limite 3"
Cells(3, 12) = "[idcelula]"
Cells(2, 13) = "Limite 4"
Cells(3, 13) = "[idcelula]"
Cells(2, 14) = "Intervalo"
Cells(3, 14) = "[n°celulas]"
'Iniciar variaveis
k = 0
'Limite rampa constante|
lim1 = 0
'Ciclo calculo das diferenças
For i = 2 To ult
'Valor atual
actual = Range("C" & i).Value
'Diferença relativamente à referência(Min)
dif = actual - Min
Cells(1, 4) = dif
'Primeiro limite
If dif >= 0 Then
lim1 = lim1 + 1
End If
Next
'Margem
lim11 = lim1 - 2000
Cells(4, 8) = lim11
'Encontrar células que têm valor igual ao mínimo global
For j = lim1 To ult
If Cells(j, 3) = pmin Then
k = k + 1
Cells(k + 5, 9) = j
If k = 1 Then
Cells(4, 10) = j
End If
End If
Next
lim2 = Cells(4, 10)
'Encontra o máximo (segundo) no intervalo por mim definido
Max2 = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(lim2, 3), Cells(ult, 3)))
Cells(4, 11) = Max2
'Encontra o número de celulas que contêm valor igual ao máximo
For u = lim2 To ult
If Cells(u, 3) = Max2 Then
w = w + 1
Cells(w + 5, 11) = u
If w = 1 Then
Cells(4, 12) = u
End If
End If
Next
'Máximo
lim3 = Cells(4, 12)
'Última célula analisada
lim4 = lim3 + 2000
Cells(4, 13) = lim4
'O número de células desde o primeiro limite até ao último
Cells(4, 14) = Cells(4, 13) - Cells(4, 8)
End Sub
```

Figura 8.4-Macro “extremos” para definição do intervalo relevante para estudo.

Utilizou-se um valor referência, que é o mínimo do patamar inicial (impactor parado) e foi-se comparando com o valor atual lido pelo programa de forma a definir a célula inicial a analisar.

Quando essa diferença é maior que zero, temos o nosso limite (Figura 8.4-lim1), ao qual foram incrementadas algumas células por segurança. (Figura 8.4-lim11).

Calculou-se o mínimo global (Figura 8.4-lim2) e o primeiro máximo após se atingir o mínimo global (Figura 8.4-lim3). Definiu-se o último valor a ser analisado incrementando algumas células ao valor calculado anteriormente (Figura 8.4-lim4).



Na Figura 8.5 é apresentada a folha *Excel* “Originais” para o ensaio 4.6 que resulta da execução da primeira parte da macro “*encoder*“(Figura 8.2-Parte 1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Time - Voltage - Encoder	Amplitude - Voltage - Encoder	data	Diferença											
2	0	984,3	0,9843	0,0011											
3	4,00E-05	983,9	0,9839	0,0007			Refer.	Limite 1	Minimo	Limite 2	Maximo	Limite 3	Limite 4	Intervalo	
4	8,00E-05	984,1	0,9841	0,0009			[m]	[idcelula]	[m]	[idcelula]	[m]	[idcelula]	[idcelula]	[nºcelulas]	
5	0,00012	984	0,984	0,0008			0,9832	13588	0,09657	26587	0,5409	34329	36329	22741	
6	0,00016	984	0,984	0,0008					[idcelula]		[idcelula]				
7	0,0002	984,1	0,9841	0,0009					26587		34329				
8	0,00024	983,9	0,9839	0,0007							34396				
9	0,00028	984	0,984	0,0008											
10	0,00032	983,8	0,9838	0,0006											
11	0,00036	984,1	0,9841	0,0009											
12	0,0004	984	0,984	0,0008											
13	0,00044	984,1	0,9841	0,0009											
14	0,00048	983,9	0,9839	0,0007											
15	0,00052	983,6	0,9836	0,0004											
16	0,00056	984,1	0,9841	0,0009											
17	0,0006	983,7	0,9837	0,0005											
18	0,00064	984	0,984	0,0008											
19	0,00068	983,8	0,9838	0,0006											
20	0,00072	983,9	0,9839	0,0007											
21	0,00076	983,8	0,9838	0,0006											
22	0,0008	983,8	0,9838	0,0006											
23	0,00084	983,9	0,9839	0,0007											
24	0,00088	984,3	0,9843	0,0011											
25	0,00092	984	0,984	0,0008											

Figura 8.5-Folha *Excel* “Originais“ do ficheiro “4.6 *encoder.xlsx*” .

A primeira e segunda colunas são os dados originais de tempo e deslocamento, a terceira coluna são os dados de posição após a passagem da macro “*Conversão*”, a quarta coluna é a diferença utilizada para o cálculo do primeiro ponto a ser analisado.

Dos restantes valores, salienta-se o limite 1 e o limite 4 que são respetivamente a célula inicial e final do intervalo a estudar. Encontram-se também representados o mínimo e o máximo que foram utilizados para o cálculo destes limites.

### 8.2.3 Aplicação do filtro *butterworth*

Os dados de tempo e posição, de acordo com os limites definidos anteriormente, foram copiados para uma nova folha *Excel* denominada de “*Dados*”, onde se aplicou o filtro *butterworth* (recomenda-se a consulta da Figura 8.2-Parte 2).

Para garantir que o filtro era executado corretamente foi necessário seguir as instruções presentes no manual deste filtro [19] e construir o programa de acordo com essas informações .

Na Figura 8.6 é apresentada a folha *Excel* “Dados”, do ficheiro “4.6 encoder. xlsx”. Após a execução do filtro *butterworth*, são criadas 3 novas colunas (Figura 8.6-região a verde), que são respetivamente o deslocamento filtrado, a velocidade e a aceleração ao longo do tempo.

Importa referir que estes dados foram obtidos mediante a utilização de um “cut-off” de 80 Hz (Figura 8.6-célula C1) de acordo com os resultados obtidos em trabalhos anteriores [4].

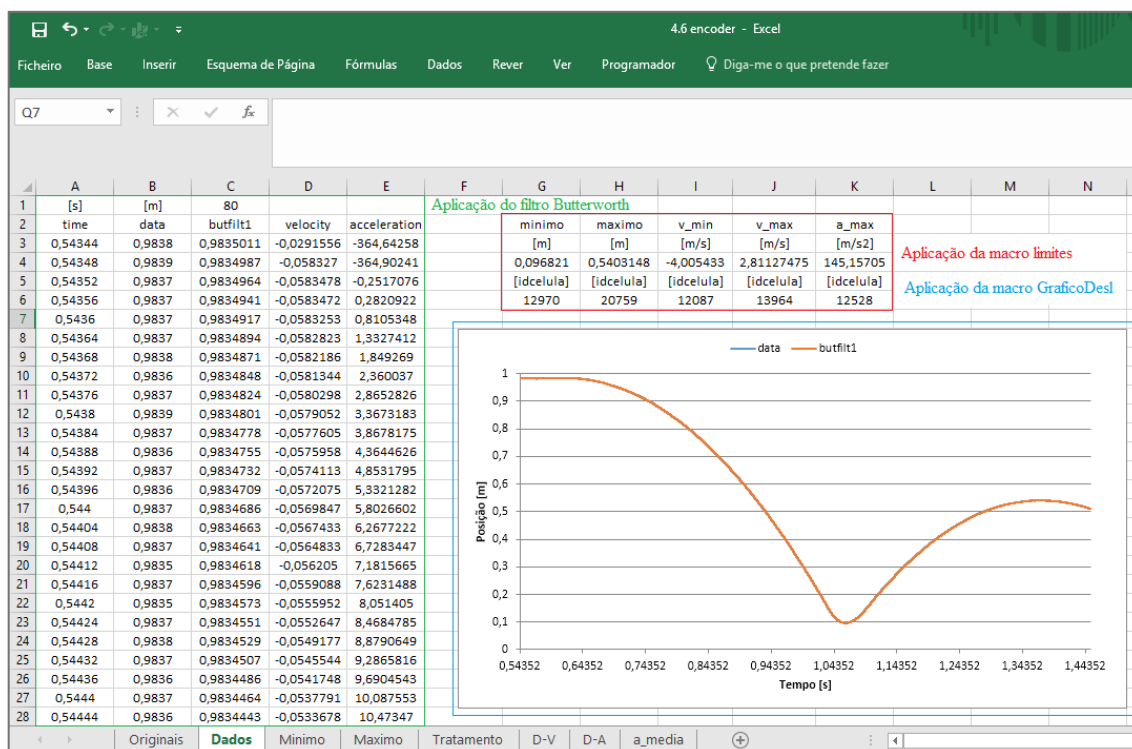


Figura 8.6- Visualização da folha *Excel* “Dados” do ficheiro “4.6 encoder. xlsx”.

Realizou-se uma análise preliminar dos dados obtidos recorrendo à macro limites (Figura 8.7), a partir da qual se calcularam: a posição mínima e máxima atingida pelo impactor (com base no deslocamento filtrado); a velocidade mínima e máxima e a aceleração máxima bem como o número da célula correspondente (Figura 8.6-região vermelha).

O gráfico presente na Figura 8.6 é o gráfico de deslocamento original (data) e filtrado (butfilt1) para toda a região de interesse, criou-se uma macro, designada de “graficoDesl” a partir da qual se criam automaticamente alguns dos gráficos presentes nos ficheiros “i.j encoder. xlsx”. Essa macro encontra-se na secção seguinte (secção 8.2.4).

```

Sub limites()
'Última célula
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
Cells(2, 7) = "minimo"
Cells(3, 7) = "[m]"
Cells(5, 7) = "[idcelula]"
'Cálculo do deslocamento mínimo
minbut = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(3, 3), Cells(ult, 3)))
Cells(4, 7) = minbut
'Identificação do número da célula onde ocorre o deslocamento mínimo
For i = 2 To ult
    If Cells(i, 3) = minbut Then
        Cells(6, 7) = i
    End If
    minlim = Cells(6, 7)
Next
Cells(2, 8) = "maximo"
Cells(3, 8) = "[m]"
Cells(5, 8) = "[idcelula]"
'Cálculo do deslocamento máximo global
maxbut = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(minlim, 3), Cells(ult, 3)))
Cells(4, 8) = maxbut
'Identificação do número da célula onde ocorre o deslocamento máximo
For i = minlim To ult
    If Cells(i, 3) = maxbut Then
        Cells(6, 8) = i
    End If
    maxlim = Cells(6, 8)
Next
Cells(2, 9) = "v_min"
Cells(3, 9) = "[m/s]"
Cells(5, 9) = "[idcelula]"
'Cálculo da velocidade mínima global
velimp = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(3, 4), Cells(ult, 4)))
Cells(4, 9) = velimp
'Identificação do número da célula onde ocorre a velocidade mínima global
For i = 2 To minlim
    If Cells(i, 4) = velimp Then
        Cells(6, 9) = i
    End If
    maxlim = Cells(6, 8)
Next
Cells(2, 9) = "v_min"
Cells(3, 9) = "[m/s]"
Cells(5, 9) = "[idcelula]"
'Cálculo da velocidade mínima global
velimp = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(3, 4), Cells(ult, 4)))
Cells(4, 9) = velimp
'Identificação do número da célula onde ocorre a velocidade mínima global
For i = 2 To minlim
    If Cells(i, 4) = velimp Then
        Cells(6, 9) = i
    End If
    limvel = Cells(6, 9)
Next
Cells(2, 10) = "v_max"
Cells(3, 10) = "[m/s]"
Cells(5, 10) = "[idcelula]"
'Cálculo velocidade máxima global
velres = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(3, 4), Cells(ult, 4)))
Cells(4, 10) = velres
'Identificação do número da célula onde ocorre a velocidade máxima global
For i = limvel To ult
    If Cells(i, 4) = velres Then
        Cells(6, 10) = i
    End If
    limres = Cells(6, 10)
Next
Cells(2, 11) = "a_max"
Cells(3, 11) = "[m/s2]"
Cells(5, 11) = "[idcelula]"
'Cálculo da aceleração máxima-->Cálculo da Fmax através da 2ª lei de Newton
'Não é necessário ir até ao último elemento para procurar a aceleração máxima
'basta ir até à célula onde o deslocamento é mínimo
amax = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(5, 5), Cells(minbut, 5)))
Cells(4, 11) = amax
For i = 5 To minbut
    If Cells(i, 5) = amax Then
        Cells(6, 11) = i
    End If
    lima = Cells(6, 11)
Next
End Sub

```

Figura 8.7- Macro “limites”, para o cálculo das variáveis enumeradas no programa.

## 8.2.4 Criação automática de gráficos

Na Figura 8.8 encontra-se representada a macro “GraficoDesl” a partir da qual foi possível a criação de gráficos de forma automática.

```
Sub GraficoDesl()
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
Set myChtObj = ActiveSheet.ChartObjects.Add _
(Left:=350, Width:=500, Top:=100, Height:=300)
    If ActiveSheet.Name = "Tratamento" Or ActiveSheet.Name = "Dados"
        Or ActiveSheet.Name = "Maximo" Or ActiveSheet.Name = "Minimo" Then
        Range(Cells(2, "A"), Cells(ult, "C")).Select
    End If
    If ActiveSheet.Name = "D-V" Then
        Range(Cells(2, "A"), Cells(ult - 190, "D")).Select
    End If
    If ActiveSheet.Name = "D-A" Then
        Set myChtObj = ActiveSheet.ChartObjects.Add _
        (Left:=350, Width:=510.2, Top:=100, Height:=300)
        Range(Cells(2, "A"), Cells(ult - 190, "D")).Select
    End If
    'Range(Cells(2, "A"), Cells(ult, "E")).Select
Set selecao = Selection
With selecao
'colunas, ofset em linhas (so titulo e valores) e
Set selcol = .Columns(1).Offset(1).Resize(.Rows.Count - 1)
    If ActiveSheet.Name = "D-A" Or ActiveSheet.Name = "D-V" Then
        Set selcol = .Columns(1).Offset(3).Resize(.Rows.Count - 1)
        selcol.Select
    End If
End With
With myChtObj.Chart
    .ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
    Do Until .SeriesCollection.Count = 0
        .SeriesCollection(1).Delete
    Loop
        For iColumn = 2 To selecao.Columns.Count
            With .SeriesCollection.NewSeries
                .Values = selcol.Offset(, iColumn - 1)
                .XValues = selcol
                .Name = selecao(1, iColumn)
            End With
        Next
    End With
    ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
    Maxgrf = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(3, 3), Cells(ult, 3)))
' Formatação dos eixos
With myChtObj.Chart
    .Legend.Position = xlLegendPositionTop
    With .Axes(xlCategory, xlPrimary)
        .HasTitle = True
        .AxisTitle.Text = "Tempo [s]"
        .MinimumScale = Cells(5, 1)
        .MaximumScale = Cells(ult, 1)
    End With
    With .Axes(xlValue, xlPrimary)
        .HasTitle = True
        .AxisTitle.Text = "Posição [m]"
        If Maxgrf > 0.8 Then
            .MaximumScale = 1
        End If
        If Maxgrf > 1 Then
            .MaximumScale = 1.1
        End If
    End With
End With
End With
```

Figura 8.8-Macro “GraficoDesl” para a geração automática de gráficos (continua na página seguinte).

```

' EIXOS SECUNDÁRIOS
' Eixos secundário (3 variáveis)
If ActiveSheet.Name = "D-A" Or ActiveSheet.Name = "D-V" Then
myChtObj.Select
ActiveChart.FullSeriesCollection(3).Select
ActiveChart.FullSeriesCollection(3).AxisGroup = 2
'Colocar o titulo nos eixos secundarios
myChtObj.Select
ActiveChart.SetElement (msoElementSecondaryValueAxisTitleAdjacentToAxis)
If ActiveSheet.Name = "D-V" Then
ActiveChart.Axes(xlValue, xlSecondary).AxisTitle.Text = "Velocidade [m/s]"
End If
If ActiveSheet.Name = "D-A" Then
ActiveChart.Axes(xlValue, xlSecondary).AxisTitle.Text = "Aceleração [m/s^2]"
End If
End If
End Sub

```

Figura 8.8-Continuação.

### 8.2.5 Verificação da viabilidade da aplicação do filtro *butterworth*

Pretendia-se agora realizar uma comparação entre os dados de deslocamento originais e os filtrados, resultantes da aplicação do filtro *butterworth* para verificar a viabilidade da utilização do deslocamento filtrado no decorrer da dissertação.

Analisou-se as zonas onde ocorre a deflexão mínima e máxima (através de dois gráficos) e que são pontos de grande interesse para o cálculo da deflexão e do ressalto máximo. O método utilizado para a criação desses gráficos é apresentado na Figura 8.9 pelo que se recomenda a sua consulta.

```

' Obtenção dos 2 gráficos na zona de deslocamento mínimo e máximo
Dim strmin As String
For i = 1 To 2
If i = 1 Then
a = "Minimo"
am = Sheets("Dados").Cells(6, 7) - 200
bm = Sheets("Dados").Cells(6, 7) + 200
ElseIf i = 2 Then
a = "Maximo"
am = Sheets("Dados").Cells(6, 8) - 200
bm = Sheets("Dados").Cells(6, 8) + 200
End If
strm = "A" & CStr(am) & ":" & "C" & CStr(bm)
'A terceira folha denomina-se Minimo
'A quarta folha denomina-se Maximo
If Sheets.Count <= 2 + i Then
ActiveSheet.Name = a
Worksheets("Dados").Range("A1:C2").Copy _
Destination:=Worksheets(a).Range("A1:C2")
Worksheets("Dados").Range(strm).Copy _
Destination:=Worksheets(a).Range("A3:C203")
Cells(1, 3) = Cells(1, 2)
' Criação do gráfico
Call Module1.GraficoDesl
End If
Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
Next
End If

```

Parte 3

Figura 8.9-3ª parte da macro *encoder* (Figura 8.2) desenvolvida para analisar a zona de deflexão máxima e mínima.

A partir do valor mínimo e máximo obtido através dos dados de deslocamento filtrado e da célula onde isso se verifica, procurou-se nos dados de deslocamento originais para a mesma região o mínimo e o máximo, esta abordagem foi utilizada devido ao ruído existente nos dados originais.

Na Tabela 8.1 apresenta-se o método de cálculo descrito anteriormente para o ensaio 4.6 e o valor do erro para o máximo e mínimo.

Tabela 8.1-Mínimo e máximo, filtrado e original e respetivo erro associado para o ensaio 4.6.

	Posição [m]	célula	Erro [m]
Mínimo filtrado	0,096821	203	±0,0001
Mínimo original	0,09663	209	
Máximo filtrado	0,5409	403	±0,0003
Máximo original	0,540315	403	

### 8.2.6 Obtenção do plano base

O plano base é obtido às custas da média de todos os valores de posição recolhidos durante a medição efetuada para o efeito, utilizou-se a macro da Figura 8.10 para obter esse valor.

Esta macro foi sendo adaptada ao longo do trabalho de forma a calcular a média de outras variáveis como a aceleração média na zona A e na zona D (Figura 8.10).

```

Sub Media ()
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + lin + 1
Sum = 0
Count = 0
' Se os dados forem relativos ao plano base
  If ActiveSheet.Name = "Plano0" Then
    a = 2
    b = ult
    c = 2
    Mean = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(a, c), Cells(b, c)))
    Cells(1, 3) = "media"
    Cells(2, 3) = Mean
  End If

```

Cota plano base

Figura 8.10-Macro “Media” para o cálculo da média de variáveis, incluindo o plano base (continua na página seguinte).

<pre>'Aceleração gravitica If ActiveSheet.Name = "Tratamento" Then   'Até ao impacto   If Cells(4, 7) = "" Then     a = 4000     b = Cells(6, 5) - 1000     c = 5     Sheets("Dados").Activate     Mean = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(a, c), Cells(b, c)))     Sheets("Tratamento").Activate     Cells(4, 7) = Mean   End If   'Enquanto o impactor está parado   If Cells(4, 7) &lt;&gt; "" And Cells(4, 8) = "" Then     a = 5     b = 600     c = 5     Sheets("Dados").Activate     Mean = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(a, c), Cells(b, c)))     Sheets("Tratamento").Activate     Cells(4, 8) = Mean   End If   ' Após o impacto   If Cells(4, 8) &lt;&gt; "" And Cells(4, 9) = "" Then     a = Cells(6, 6).Value + 5000     b = ult - 2000     c = 5     Sheets("Dados").Activate     Mean = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(a, c), Cells(b, c)))     Sheets("Tratamento").Activate     Cells(4, 9) = Mean   End If End If End Sub</pre>	<p>Cálculo da aceleração média</p>
---	--

Figura 8.10-Continuação.

Na Figura 8.11 é apresentado o programa a partir do qual se calculou o plano base para cada ficheiro “i.0 encoder.xlsx” (com i de 1 a 14, para a primeira amostra). Na Figura 8.12 é apresentado o ficheiro “4.0 encoder.xlsx” após a aplicação da macro “Media”.

```
Sub open_resultados()
  ' Abro a folha de resultados
  ficres = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\Resultados.xlsx"
  Workbooks.Open (ficres)
  j = 0
  'Para todos os pontos
  For i = 1 To 14 Step 1
    ' Os ficheiros "i.0 encoder.xlsx", para definir a cota do plano base
    ficzer = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\" & i & "." & j & " encoder.xlsx"
    Workbooks.Open (ficzer)
    ficz = i & "." & j & " encoder.xlsx"
    'Denomina a folha Plano0
    ActiveSheet.Name = "Plano" & j
    nome = "Plano" & j
    ' Definição do valor medio para a cota do plano base
    Call Module1.Media
    ' Copia-se os valores médios para o livro de resultados.
    Worksheets(nome).Cells(2, 3).Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Plano Base").Cells(1 + i, j + 2)
    Columns("A:C").HorizontalAlignment = xlCenter
    Workbooks(ficz).Close SaveChanges:=True
    Columns("A:C").HorizontalAlignment = xlCenter
    Sheets("Plano Base").Activate
  Next
End Sub
```

Figura 8.11-Macro “open\_resultados” para o cálculo da cota do plano base.

	A	B	C
1	Time - Voltage - Encoder	Amplitude - Voltage - Encoder	media
2	0	183,5	183,5113
3	4,00E-05	183,6	
4	8,00E-05	183,3	
5	0,00012	183,3	
6	0,00016	183,4	
7	0,0002	183,4	
8	0,00024	183,5	
9	0,00028	183,6	
10	0,00032	183,6	
11	0,00036	183,5	
12	0,0004	183,6	
13	0,00044	183,5	
14	0,00048	183,6	
15	0,00052	183,6	
16	0,00056	183,7	
17	0,0006	183,4	
18	0,00064	183,6	
19	0,00068	183,6	
20	0,00072	183,5	
21	0,00076	183,5	
22	0,0008	183,5	
23	0,00084	183,8	
24	0,00088	183,5	
25	0,00092	183,5	

Figura 8.12- Ficheiro “4.0 *encoder.xlsx*”, folha *Excel* “Plano0”, valor do plano base.

Neste momento os valores da cota do plano base encontravam-se guardados no ficheiro “Resultados.xlsx” a fim de serem utilizados futuramente.

A macro “resultados” apresentada na Figura 8.13 é executada para todos os ficheiros “i.j *encoder.xlsx*”, nesta macro está integrada a macro “*encoder*” (Figura 8.2) pelo que todas as etapas descritas anteriormente são realizadas quando se executa a macro “resultados”.

```

Sub resultados()
'Abre todos os ficheiros encoder
For i = 1 To 14 Step 1
  For j = 1 To 10 Step 1
    ficenc = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\" & i & "." & j & " encoder.xlsx"
    fice = i & "." & j & " encoder"
    Workbooks.Open (ficenc)
'O módulo encoder (faz todo o pré-processamento)
Call Module1.Encoder
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
'Copio e colo os valores medios do plano base para o livro "i.j encoder"
Workbooks("Resultados").Sheets("Plano Base").Activate
Cells(i + 1, 2).Select
Selection.Copy
Workbooks(fice).Activate
Worksheets("Tratamento").Range(Cells(3, 2), Cells(ult, 2)).Select
ActiveSheet.Paste

```

Figura 8.13-Macro “resultados”.



```

' Valores medios da posição inicial
Sheets("Dados").Activate
Mean = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(3, "C"), Cells(300, "C")))
Workbooks("Resultados").Worksheets("Plano Base").Cells(j + 1, i + 6).Value = Mean
' Minimo (na folha de Resultados faz-se deflexão= plano base-minimo)
Worksheets("Dados").Cells(4, 7).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Deflexão").Cells(j + 1, i + 1)
' Máximo (na folha de Resultados faz-se deflexão= maximo-plano base)
Worksheets("Dados").Cells(4, 8).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Ressalto").Cells(j + 1, i + 1)
' Velocidade mínima
Worksheets("Dados").Cells(4, 9).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Velocidade impacto (minimo)").Cells(j + 1, i + 1)
' Velocidade máxima
Worksheets("Dados").Cells(4, 10).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Velocidade ressalto (maximo)").Cells(j + 1, i + 1)
' amax->Fmax
Worksheets("Dados").Cells(4, 11).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Aceleração Máx").Cells(j + 1, i + 1)
' Velocidade impacto no plano base
Worksheets("Tratamento").Cells(4, 5).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Velocidade impacto (Plano Base)").Cells(j + 1, i + 1)
' Velocidade após impacto no plano base
Worksheets("Tratamento").Cells(4, 6).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Velocidade ressalto (Plano Base)").Cells(j + 1, i + 1)
' Aceleração gravitica
Worksheets("Tratamento").Cells(4, 7).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Aceleração queda livre impacto").Cells(j + 1, i + 1)
' Aceleração patamar
Worksheets("Tratamento").Cells(4, 8).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Aceleração rampa").Cells(j + 1, i + 1)
' Aceleração gravitica
Worksheets("Tratamento").Cells(4, 9).Copy _
Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Aceleração queda livre ressalto").Cells(j + 1, i + 1)
' Criação dos gráficos Deslocamento-Velocidade-Tempo & Deslocamento-Aceleração-Tempo
Call Module2.D_V_A
Workbooks(fice).Close SaveChanges:=True
Next
End Sub

```

Figura 8.13-Continuação.

A execução da macro “resultados” faz com que os valores do plano base que estavam armazenados no ficheiro “Resultados.xlsx” sejam copiados para a folha *Excel* “Tratamento” (criada a partir da macro “*encoder*”, consultar-parte 4) do ficheiro “i.j *encoder.xlsx*” correspondente (Figura 8.14-Coluna B).

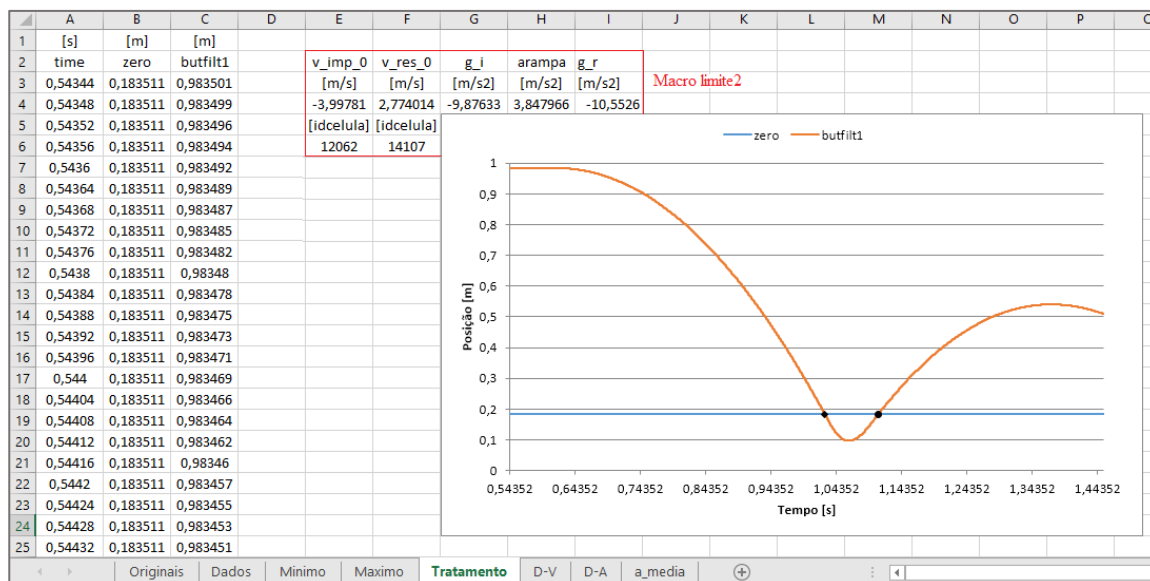


Figura 8.14-Folha Excel “Tratamento” para o ficheiro “4.6 encoder.xlsx”

### 8.2.7 Cálculo da velocidade de impacto/ressalto e da aceleração antes/após o impacto

Na região rodeada a vermelho da Figura 8.14 encontra-se informação referente ao valor numérico (e à célula) da velocidade de impacto ( $v_{imp_0}$ , célula E4), da velocidade de ressalto ( $v_{res_0}$ , célula F4), da aceleração antes ( $g_i$ , célula G4) e após o impacto ( $g_r$ , célula I4) e da aceleração enquanto o impactor está parado (arampa, célula E4).

O método de cálculo destas variáveis pode ser visto na Figura 8.15 que é uma macro denominada “limite2”, a macro está devidamente comentada pelo que se recomenda a sua consulta. Esta macro está integrada na macro “resultados” da Figura 8.13 (sublinhado a vermelho).

Para o cálculo da aceleração (inicial, antes e após o impacto) recorreu-se macro “Media” já referida anteriormente (Figura 8.10).

```

Sub limite2()
Sheets("Tratamento").Activate
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
' Calculo da velocidade no plano base
Cells(2, 5) = "v_imp_0"
Cells(3, 5) = "[m/s]"
Cells(5, 5) = "[idcelula]"
For i = 3 To ult
    'Quando o valor da célula actual for menor ou igual à cota plano base
    If Cells(i, 3) <= Cells(3, 2) Then Exit For
Next
b_imp = i
'Guarda a identificação da célula onde isso se verifica
Cells(6, 5) = b_imp
'Valor da velocidade nesse ponto-> velocidade impacto
Cells(4, 5) = Sheets("Dados").Cells(i, 4)
Cells(2, 6) = "v_res_0"
Cells(3, 6) = "[m/s]"
Cells(5, 6) = "[idcelula]"
' Desde a célula onde ocorre o impacto até ao final
For i = b_imp To ult
    'Quando o valor da célula actual for maior ou igual à cota plano base
    If Cells(i, 3) >= Cells(3, 2) Then Exit For
Next
b_res = i
'Guarda a identificação da célula onde isso se verifica
Cells(6, 6) = b_res
'Valor da velocidade nesse ponto-> velocidade ressalto
Cells(4, 6) = Sheets("Dados").Cells(i, 4)

'Aceleração em queda livre até ao impacto
Cells(2, 7) = "g_i"
Cells(3, 7) = "[m/s2]"
Call Module1.Media
'Aceleração em patamar
Cells(2, 8) = "arampa"
Cells(3, 8) = "[m/s2]"
Call Module1.Media
'Aceleração em queda livre após impacto
Cells(2, 9) = "g_r"
Cells(3, 9) = "[m/s2]"
Call Module1.Media
End Sub

```

Figura 8.15-Macro “limites2”.

Relativamente à macro “resultados” da Figura 8.13, após a execução da rotina “limites2” é executada uma média dos valores de deslocamento iniciais, a partir da qual é possível obter o valor médio da posição inicial do impactor em cada ensaio, esse valor é copiado para a folha “Resultados.xlsx” como é demonstrado na Figura 8.16.

Conhecendo o plano base (Figura 8.16-rodado a vermelho) e a posição inicial (média) do impactor para cada ponto testado (Figura 8.16-Coluna C) foi possível verificar que a altura de queda respeita os requisitos da FIG (800 mm) (Figura 8.16-Coluna D).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		Zero[mm]	data	Desl[mm]		[m]	1	2	3	4	5	6	7
2	1	180,69295	979,1176547	798		1	0,982669	0,9844	0,983145	0,984811	0,989237	0,984665	0,982528
3	2	183,46283	980,1795217	797		2	0,982039	0,983096	0,983195	0,984709	0,988504	0,98364	0,985806
4	3	183,69828	982,9154627	799		3	0,980902	0,983182	0,983054	0,983447	0,98874	0,982163	0,98326
5	4	183,51133	982,4003755	799		4	0,981252	0,983	0,983311	0,98278	0,989228	0,983568	0,98326
6	5	188,72070	988,7252449	800		5	0,980243	0,980175	0,982871	0,980878	0,989019	0,981223	0,983726
7	6	182,40535	982,7238778	800		6	0,979331	0,977516	0,982346	0,983463	0,988297	0,984039	0,982411
8	7	184,53536	983,1039303	799		7	0,977381	0,980103	0,983358	0,982499	0,988925	0,982467	0,983034
9	8	187,28543	985,4132711	798		8	0,978324	0,98002	0,982577	0,981704	0,988895	0,981979	0,983962
10	9	184,12971	984,5857239	800		9	0,978193	0,978734	0,982793	0,982382	0,987888	0,984401	0,982681
11	10	187,12325	987,1392906	800		10	0,977317	0,978706	0,983015	0,98205	0,98881	0,981952	0,982496
12	11	184,63536	984,8276930	800									
13	12	183,61577	984,7229701	801		Média(8)	0,979118	0,98018	0,982915	0,9824	0,988725	0,982724	0,983104
14	13	185,97846	985,4718568	799		D-P(8)	0,001549	0,002013	0,000346	0,000871	0,000431	0,001136	0,000561
15	14	184,75256	985,1701672	800									

Figura 8.16-Ficheiro“Resultados.xlsx”, folha Excel “Plano Base”.

A folha Excel da Figura 8.16, contém a posição inicial (média) do impactor para cada um dos ensaios (Colunas G-T, apesar de na figura só estar até ao M) e o respetivo valor médio para cada ponto (linha G14-T14). Na coluna B o plano base para cada ponto testado.

A macro “resultados” da Figura 8.13 também é responsável por transferir variáveis importantes para a folha “Resultados.xlsx” (o programa encontra-se comentado pelo que é desnecessária a enumeração dessas variáveis).

A rotina “D-V-A” que é executada no final da macro “resultados” serve essencialmente para criação de duas novas folhas a partir das quais se criaram os gráficos da Figura 5.5 (Velocidade-Posição-Plano Base-Tempo) e Figura 5.6 (Aceleração-Posição-Plano Base-Tempo).

```

Sub D_V_A()
Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
ActiveSheet.Name = "D-V"
Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
ActiveSheet.Name = "D-A"
'activa a folha onde se vai buscar os dados
Sheets("Tratamento").Activate
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
' Copia os dados entre folhas(Tratamento e D-V)
Worksheets("Tratamento").Range(Cells(1, "A"), Cells(ult, "C")).Select
Selection.Copy
' Copia (tempo, plano base,deslocamento) do tratamento para D-V e D-A
Sheets("D-V").Activate
Worksheets("D-V").Range(Cells(1, "A"), Cells(ult, "C")).Select
ActiveSheet.Paste
Cells(2, 1) = "Tempo"
Cells(1, 4) = "[m/s]"
Cells(2, 4) = "Velocidade"
Cells(2, 3) = "Deslocamento"
Cells(2, 2) = "Plano Base"
Columns("B:D").ColumnWidth = 15
Sheets("D-A").Activate
Worksheets("D-A").Range(Cells(1, "A"), Cells(ult, "C")).Select
ActiveSheet.Paste
Cells(2, 1) = "Tempo"
Cells(1, 4) = "[m/s^2]"
Cells(2, 4) = "Aceleração"
Cells(2, 3) = "Deslocamento"
Cells(2, 2) = "Plano Base"
Columns("B:D").ColumnWidth = 15
Application.CutCopyMode = False

Sheets("Dados").Activate
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
Worksheets("Dados").Range(Cells(3, "D"), Cells(ult, "D")).Select
Selection.Copy
Sheets("D-V").Activate
Worksheets("D-V").Range(Cells(3, "D"), Cells(ult, "D")).Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Columns("A:I").HorizontalAlignment = xlCenter
Call Module1.GraficoDesl

Sheets("Dados").Activate
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
Worksheets("Dados").Range(Cells(3, "E"), Cells(ult, "E")).Select
Selection.Copy
Sheets("D-A").Activate
Worksheets("D-A").Range(Cells(3, "D"), Cells(ult, "D")).Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Columns("A:I").HorizontalAlignment = xlCenter
Call Module1.GraficoDesl
End Sub

```

Figura 8.17-Macro D-V-A para a criação dos gráficos.

## 8.2.8 Cálculo da força máxima impacto e aceleração média através da célula de carga

Na rotina denominada de “fmax” da Figura 8.18, os ficheiros do tipo “i.j célula.xlsx” são abertos e o seu mínimo é extraído.

Como a célula de carga trabalha sob compressão, os valores de força são negativos, contudo é a força máxima que se está a extrair de qualquer forma.

A partir programa denominado “a\_media” calculou-se a aceleração média a cada instante (Figura 8.18).

```
Sub fmax()
For i = 1 To 14 Step 1
  For j = 1 To 10 Step 1
    ficfmax = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\" & i & "." & j & " célula.xlsx"
    ficm = i & "." & j & " célula"
    Workbooks.Open (ficfmax)
    ActiveSheet.Name = "Força"
    ' De KN para N
    Call Module1.Conversão
    ' Força máxima impacto
    fimax = WorksheetFunction.Min(Range("C:C"))
    Cells(1, 4) = "Fmax"
    Cells(2, 4) = "[N]"
    Cells(3, 4) = fimax
    Module2.a_media
    ' Copia esse valor para o ficheiro de "resultados.xlsx"
    Worksheets("Força").Cells(3, 4).Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Fmax(célula)").Cells(j + 1, i + 1)
    Workbooks(ficm).Close SaveChanges:=True
  Next
Next
End Sub

Sub a_media()
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
Cells(1, 5) = "Massa"
Cells(2, 5) = "[kg]"
Cells(3, 5).Value = 20.2
Cells(1, 5) = "massa"
  For i = 2 To ult
    Cells(1, "F") = "a_media"
    ' Pela segunda Lei de Newton a=F/m
    Cells(i, "F").Value = Cells(i, "C").Value / Cells(3, 5).Value
  Next
Columns("A:I").HorizontalAlignment = xlCenter
End Sub
```

Figura 8.18-Macros “fmax” e “a\_media”, a partir das quais se calcula a força máxima de impacto e a aceleração média ao longo do ensaio (via célula carga).

Na Figura 8.19 é apresentada a folha *Excel* “Força” para o ficheiro “4.6 célula.xlsx”, esta folha é gerada a partir da macro “fmax”.

	B	C	D	E	F
1	Amplitude - Force (Bridge) - Force	data	Fmax	massa	a_media
2	-13,41	-13,41	[N]	[kg]	-0,66386
3	-15,14	-15,14	-3178	20,2	-0,7495
4	-8,337	-8,337			-0,41272
5	-13,97	-13,97			-0,69158
6	-7,893	-7,893			-0,39074
7	-11,44	-11,44			-0,56634
8	-11,33	-11,33			-0,56089
9	-15,43	-15,43			-0,76386
10	-13,56	-13,56			-0,67129
11	-8,833	-8,833			-0,43728
12	-16,87	-16,87			-0,83515
13	-9,698	-9,698			-0,4801
14	-13,79	-13,79			-0,68267
15	-10,01	-10,01			-0,49554
16	-9,21	-9,21			-0,45594
17	-13,63	-13,63			-0,67475
18	-13,61	-13,61			-0,67376
19	-10,62	-10,62			-0,52574
20	-13,23	-13,23			-0,65495
21	-12,18	-12,18			-0,60297
22	-9,817	-9,817			-0,48599
23	-9,787	-9,787			-0,4845
24	-13,59	-13,59			-0,67277
25	-13,48	-13,48			-0,66733

Figura 8.19- Ficheiro “4.6 célula.xlsx”, folha *Excel* “Força”

Da análise da Figura 8.19 verifica-se que, para o ensaio 4.6, o valor numérico da força máxima de impacto medida pela célula de carga corresponde ao valor da célula D3.

Na coluna F tem-se aceleração média ao longo do tempo, calculada através da aplicação da 2ª lei de Newton (Figura 8.18-macro “a\_media”).

Na Figura 8.20 é visível a macro “*encoder\_celula*” a partir da qual se integram os dados de ambos os sensores na mesma folha *Excel* designada “a\_media” que faz parte do ficheiro “i.j *encoder.xlsx*”. A rotina “*limites3*”, apresentada na Figura 8.21, é executada nesta macro.

```

Sub encoder_celula()
For i = 1 To 14 Step 1
  For j = 1 To 10 Step 1
    ficenc = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\" & i & "." & j & " encoder.xlsx"
    fice = i & "." & j & " encoder"
    Workbooks.Open (ficenc)
    ' Nova folha
    Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)
    ActiveSheet.Name = "a_media"
    ' Copia o tempo
    Sheets("Originals").Activate
    ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
    Worksheets("Originals").Range(Cells(2, "A"), Cells(ult, "A")).Select
    Selection.Copy
    Sheets("a_media").Activate
    Worksheets("a_media").Range(Cells(2, "A"), Cells(ult, "A")).Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False
    ' Retirar a a_media apartir dos valores de força da célula de carga
    ficfmax = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\" & i & "." & j & " celula.xlsx"
    ficm = i & "." & j & " celula"
    Workbooks.Open (ficfmax)
    ActiveSheet.Name = "Força"
    ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1
    'Copia esses valores para ficheiro a_media
    Worksheets("Força").Range(Cells(1, "F"), Cells(ult, "F")).Select
    Selection.Copy
    Workbooks(fice).Activate
    Worksheets("a_media").Range(Cells(1, "B"), Cells(ult, "B")).Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False
    Cells(1, 1) = "time"
    Workbooks(ficm).Close SaveChanges:=True
    'Força_célula de carga
    For k = 2 To ult
      Cells(k, "C") = Cells(k, "B") * 20.2
    Next
    Cells(1, "C") = "F_celula"
    'valores dos limites iniciais, os dados da força ainda nao foram "limpos" ate agora
    'limite 1
    c = Sheets("Originals").Cells(4, "H")
    'limite 4
    cc = Sheets("Originals").Cells(4, "M")
    interv = cc - c
    'Copia esses valores para as colunas D e E
    Sheets("a_media").Activate
    Range(Cells(c, "A"), Cells(cc, "C")).Select
    Selection.Copy
    Range(Cells(3, "E"), Cells(interv + 3, "G")).Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False

    Cells(1, 5) = "time"
    Cells(2, 5) = "[s]"
    Cells(1, 6) = "a_media"
    Cells(2, 6) = "[m/s2]"
    Cells(1, 7) = "F_celula"
    Cells(2, 7) = "[N]"
    Call Module2.limite3
    Columns("A:H").HorizontalAlignment = xlCenter
    Workbooks(fice).Close SaveChanges:=True
  Next
Next
End Sub

```

Figura 8.20-Macro “*encoder\_celula*” a partir da qual se reúnem na mesma folha *Excel* os dados medidos pelo *encoder* de fio e pela célula de carga.



```

Sub limites3()
Sheets("Dados").Activate
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 2
Range(Cells(3, "C"), Cells(ult, "E")).Select
Selection.Copy
Sheets("a_media").Activate
Range(Cells(3, "H"), Cells(ult, "J")).Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Cells(1, "H") = "butfilt"
Cells(2, "H") = "[m]"
Cells(1, "I") = "velocity"
Cells(2, "I") = "[m/s]"
Cells(1, "J") = "aceleração"
Cells(2, "J") = "[m/s^2]"
Columns("A:J").HorizontalAlignment = xlCenter
End Sub

```

Figura 8.21-Macro “limites3”, copia os valores de deslocamento filtrado, velocidade e aceleração para a folha *Excel* “a\_media”.

Na Figura 8.22 é apresentada a folha *Excel* “a\_media”, resultante da execução da macro “célula-encoder” presente na Figura 8.20.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	time	a_media	F_celula	F_celula	time	a_media	F_celula	butfilt	velocity	aceleração
2	0	-0,663861386	-13,41	13,41	[s]	[m/s <sup>2</sup> ]	[N]	[m]	[m/s]	[m/s <sup>2</sup> ]
3	4,00E-05	-0,74950495	-15,14	15,14	0,54344	-0,495544554	-10,01	0,983501079	-0,029155643	-364,6425816
4	8,00E-05	-0,412722772	-8,337	8,337	0,54348	-0,582673267	-11,77	0,983498747	-0,058327049	-364,9024103
5	0,00012	-0,691584158	-13,97	13,97	0,54352	-0,84950495	-17,16	0,983496413	-0,058347835	-0,251707626
6	0,00016	-0,390742574	-7,893	7,893	0,54356	-0,617326733	-12,47	0,983494079	-0,058347186	0,282092159
7	0,0002	-0,566336634	-11,44	11,44	0,5436	-0,756930693	-15,29	0,983491745	-0,058325268	0,810534753
8	0,00024	-0,560891089	-11,33	11,33	0,54364	-0,703960396	-14,22	0,983489413	-0,058282343	1,33274119
9	0,00028	-0,763861386	-15,43	15,43	0,54368	-0,545049505	-11,01	0,983487083	-0,058218649	1,849269026
10	0,00032	-0,671287129	-13,56	13,56	0,54372	-0,394059406	-7,96	0,983484755	-0,058134401	2,360036955
11	0,00036	-0,437277228	-8,833	8,833	0,54376	-0,513861386	-10,38	0,983482432	-0,058029846	2,865282583
12	0,0004	-0,835148515	-16,87	16,87	0,5438	-0,719306931	-14,53	0,983480113	-0,057905179	3,367318296
13	0,00044	-0,48009901	-9,698	9,698	0,54384	-0,494059406	-9,98	0,983477799	-0,05776046	3,867817494
14	0,00048	-0,682673267	-13,79	13,79	0,54388	-0,556930693	-11,25	0,983475492	-0,057595753	4,364462554
15	0,00052	-0,495544554	-10,01	10,01	0,54392	-0,708415842	-14,31	0,983473192	-0,057411303	4,853179475
16	0,00056	-0,455940594	-9,21	9,21	0,54396	-0,44460396	-8,981	0,983470899	-0,057207499	5,332128203
17	0,0006	-0,674752475	-13,63	13,63	0,544	-0,674752475	-13,63	0,983468615	-0,056984733	5,802660208
18	0,00064	-0,673762376	-13,61	13,61	0,54404	-0,576732673	-11,65	0,98346634	-0,056743286	6,267722231
19	0,00068	-0,525742574	-10,62	10,62	0,54408	-0,444950495	-8,988	0,983464076	-0,056483315	6,728344663
20	0,00072	-0,654950495	-13,23	13,23	0,54412	-0,624257426	-12,61	0,983461822	-0,056205019	7,181566521
21	0,00076	-0,602970297	-12,18	12,18	0,54416	-0,747524752	-15,1	0,983459579	-0,05590879	7,623148765

Figura 8.22-Ficheiro “4.6 encoder.xlsx, ” Folha *Excel* “a\_media”;

As colunas da região rodeada a verde da Figura 8.22 são os dados originais da força medida pela célula de carga; na região rodeada a amarelo encontram-se os dados da força medida pela célula de carga para o intervalo de interesse; na região rodeada a vermelho estão os dados da *encoder* (deslocamento filtrado, velocidade e aceleração) para a zona de interesse.

## 8.2.9 Cálculo da energia cinética, potencial, mecânica e do trabalho

Com os dados do *encoder*, deslocamento filtrado e velocidade, calculou-se a energia potencial e a energia cinética, e a energia mecânica (recorrendo às expressões (2.14), (2.15) e (2.19)). Através do teorema trabalho-energia (expressão(2.24)), calculou-se o trabalho da força de impacto através da variação da energia mecânica. Com o trabalho da força de impacto (força não conservativa) calculou-se a força através da expressão (2.17) recorrendo ao deslocamento.

Na Figura 8.23 é apresentada a macro “energia” utilizada para o cálculo destas variáveis, a macro está comentada de forma a facilitar a sua compreensão.

```
Sub energia()  
'Abre todos os ficheiros encoder  
For i = 1 To 14 Step 1  
    For j = 1 To 10 Step 1  
        ficenc = "C:\Users\silvia\Documents\Tratamento_1\" & i & "." & j & " encoder.xlsx"  
        fice = i & "." & j & " encoder"  
        Workbooks.Open (ficenc)  
Sheets("a_media").Activate  
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("E:E"), ">-10") + 2  
Range(Cells(9, "R"), Cells(11, "S")).Select  
Selection.Copy  
Sheets("a_media").Activate  
Range(Cells(13, "R"), Cells(15, "S")).Select  
ActiveSheet.Paste|  
Application.CutCopyMode = False  
Cells(1, "K") = "Ecin"  
Cells(1, "L") = "Ep"  
Cells(1, "M") = "Em"  
Cells(1, "N") = "Wfnc=dEm"  
Cells(1, "O") = "F_encoder"  
Cells(1, "P") = "Wfr=dEc"  
Cells(1, "Q") = "F_encoder"  
Cells(2, "K") = "[J]"  
Cells(2, "L") = "[J]"  
Cells(2, "M") = "[J]"  
Cells(2, "N") = "[J]"  
Cells(2, "O") = "[N]"  
Cells(2, "P") = "[J]"  
Cells(2, "Q") = "[N]"  
For ii = 3 To ult  
'Ecinética=0,5*massa*velocidade^2 (2.14)  
Cells(ii, "K") = 0.5 * 20.2 * (Cells(ii, "I").Value) ^ 2  
'Epotencial=0,5*g*h (2.15)  
Cells(ii, "L") = 20.2 * 9.8 * (Cells(ii, "H").Value)  
'Emecânica=Ecinética+Epotencial (2.19)  
Cells(ii, "M") = Cells(ii, "K") + Cells(ii, "L")  
Next  
For ii = 3 To ult  
'Wfnc=dEm (2.24)  
Cells(ii + 1, "N") = Cells(ii + 1, "M") - Cells(ii, "M")  
'F_encoder_wfnc, W=F*d (2.17)  
Cells(ii + 1, "O") = Cells(ii + 1, "N") / (Cells(ii + 1, "H") - Cells(ii, "H"))  
'Wr=dEc (2.23)  
Cells(ii + 1, "P") = Cells(ii + 1, "K") - Cells(ii, "K")  
'F_encoder_wfr W=F*d (2.17)  
Cells(ii + 1, "Q") = Cells(ii + 1, "P") / (Cells(ii + 1, "H") - Cells(ii, "H"))  
Next
```

Figura 8.23-Macro “energia” (continua na próxima página).

```

'Célula antes impacto
a = Sheets("Tratamento").Cells(6, "E")
'Célula após impacto
b = Sheets("Tratamento").Cells(6, "F")
'célula onde ocorre deflexão máxima
c = Sheets("Dados").Cells(6, "G")

'Máximo é calculado desde o início do impacto até à deflexão máxima
Cells(1, "S") = "F_enc_mx_dEm"
Cells(2, "S") = "[N]"
Cells(3, "S") = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(a, "O"), Cells(b, "O")))
Cells(1, "R") = "F_enc_mx_dEc"
Cells(2, "R") = "[N]"
Cells(3, "R") = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(a, "Q"), Cells(b, "Q")))
' A energia mecânica inicial é calculada com base na média até ao impacto
Cells(5, "R") = "Em_inicial"
Cells(6, "R") = "[J]"
Cells(7, "R") = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(3, "M"), Cells(a, "M")))
' Energia cinética inicial
Cells(9, "R") = "Ec_i"
Cells(10, "R") = "[J]"
Cells(11, "R") = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(3, "K"), Cells(ult, "K")))
' A energia mecânica final é calculada com base na média após o impacto e até ao final
Cells(5, "S") = "Em_final"
Cells(6, "S") = "[J]"
Cells(7, "S") = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(b, "M"), Cells(ult, "M")))
' Energia cinética final é o máximo depois depois da deflexão até ao final
Cells(9, "S") = "Ec_f"
Cells(10, "S") = "[J]"
Cells(11, "S") = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(c, "K"), Cells(ult, "K")))

Columns("A:U").ColumnWidth = 15
Columns("A:U").HorizontalAlignment = xlCenter
'Transfere tudi para a folha de resultados
Worksheets("a_media").Cells(3, "R").Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("F_enc_mx_dEc").Cells(j + 1, i + 1)
Worksheets("a_media").Cells(3, "S").Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("F_enc_mx_dEm").Cells(j + 1, i + 1)
Worksheets("a_media").Cells(7, "R").Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Em_enc_i").Cells(j + 1, i + 1)
Worksheets("a_media").Cells(7, "S").Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Em_enc_f").Cells(j + 1, i + 1)
Worksheets("a_media").Cells(11, "R").Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Ec_i").Cells(j + 1, i + 1)
Worksheets("a_media").Cells(11, "S").Copy _
    Destination:=Workbooks("Resultados").Worksheets("Ec_f").Cells(j + 1, i + 1)
Workbooks(fice).Close SaveChanges:=True
Next
End Sub

```

Figura 8.23- Macro “energia” (continuação).

Na Figura 8.24 é apresentada a folha *Excel* “a\_media” após a aplicação da macro “energia”.

O método de cálculo das variáveis das colunas R e S da Figura 8.24 é apresentado na macro da Figura 8.23, que se encontra comentada de forma a facilitar a interpretação. Estas variáveis são depois transferidas para a folha *Excel* “Resultados.xlsx” Figura 8.23

K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Ec <sub>in</sub>	Ep	Em	Wfnc=dEm	F_encoder	Wfr=dEc	F_encoder	F_enc_mx_dEc	F_enc_mx_dEm
[J]	[J]	[J]	[J]	[N]	[J]	[N]	[N]	[N]
0,00858552	194,6938736	194,7024591					2932,185716	3130,145716
0,034360651	194,6934119	194,7277725	0,025313398	-10852,70132	0,02577513	-11050,66132		
0,034385146	194,6929499	194,727335	-0,000437487	187,4638873	2,44949E-05	-10,49611269	Em_inicial	Em_final
0,03438438	194,6924878	194,7268722	-0,000462827	198,2880606	-7,65731E-07	0,328060603	[J]	[J]
0,034358552	194,6920259	194,7263844	-0,000487799	209,0274298	-2,58276E-05	11,06742981	193,3885376	107,7839034
0,034307998	194,6915641	194,7258721	-0,000512269	219,6352315	-5,05545E-05	21,67523152		
0,034233052	194,6911029	194,7253359	-0,000536238	230,12272	-7,49464E-05	32,16272005	Ec_i	Ec_f
0,034134047	194,6906421	194,7247762	-0,00055971	240,5011592	-9,90046E-05	42,54115921	[J]	[J]
0,034011376	194,6901822	194,7241936	-0,000582628	250,7560121	-0,000122671	52,7960121	162,0392606	79,82298369
0,033865398	194,6897231	194,7235885	-0,000605028	260,9113767	-0,000145978	62,95137675		
0,033696335	194,6892652	194,7229615	-0,000627047	271,0365041	-0,000169063	73,07650415		
0,033504435	194,6888084	194,7223128	-0,000648657	281,1298057	-0,0001919	83,16980574		
0,033290183	194,688353	194,7216432	-0,000669627	291,0993775	-0,000214252	93,13937749		
0,033054249	194,6878992	194,7209534	-0,000689771	300,8725568	-0,000235934	102,9125568		
0,032797324	194,687447	194,7202444	-0,000709072	310,4475786	-0,000256925	112,4875786		
0,032519985	194,6869967	194,7195167	-0,000727647	319,8806839	-0,000277339	121,9206839		
0,032222685	194,6865484	194,7187711	-0,000745623	329,234629	-0,0002973	131,274629		
0,031905942	194,6861022	194,7180082	-0,000762936	338,4884517	-0,000316744	140,5284517		
0,031570507	194,6856583	194,7172288	-0,00077935	347,5437029	-0,000335434	149,583703		

Figura 8.24-Folha Excel “a\_media”.

Os valores da coluna N foram utilizados para o desenvolvimento do gráfico da Figura 5.17, onde se mostra o trabalho da força impacto ao longo do tempo (e o deslocamento filtrado e plano base).

Os valores da coluna M foram utilizados para o desenvolvimento do gráfico da Figura 5.18, onde se apresenta a variação da energia mecânica ao longo do ensaio.

Os valores da coluna K foram utilizados para o desenvolvimento do gráfico da Figura 5.19, onde é apresentada a variação da energia cinética ao longo do tempo.