



**Gonçalo José da Conceição Telo**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

# **Estudo de um actuador baseado em ligas com memória de forma**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos

Júri:

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Arguente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu

Vogal: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos



“Copyright” Gonçalo José da Conceição Telo, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Na realização desta dissertação culmina o meu percurso académico. Neste último capítulo, assim como ao longo destes últimos anos, existiram pessoas que, quer pelo seu apoio, amizade ou simplesmente pelo facto de estarem presentes, tornaram esta uma experiência muito mais enriquecedora. Por tudo isso merecem o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos, orientador deste trabalho, pela disponibilidade demonstrada, pelo conhecimento transmitido e pelo apoio. Um muito obrigado sincero.

Às inúmeras amizades feitas e cimentadas durante este percurso, um agradecimento pela vossa importante presença constante e um voto de que façam também parte de um novo caminho que agora inicio. Quero em especial agradecer aos meus amigos André Trepado, Carlos Mata, Luís Gonçalves, Mafalda Pardal e Viviana Delgado que me acompanharam desde o início desta etapa e ao meu amigo João Correia pelas inúmeras horas de trabalho partilhadas.

Por todo o apoio a todos os níveis e pelo amor transmitido, o meu maior agradecimento vai para toda a minha família e em especial para os meus pais e irmã, pois sem eles este objectivo nunca teria sido alcançado.



# Resumo

As ligas com memória de forma (do inglês *shape memory alloys*) apresentam propriedades únicas no seio da engenharia e, em particular, da engenharia civil e por isso são alvo de interesse nas mais variadas áreas. Na sua aplicação sob a forma de actuadores é tirado partido do seu efeito de memória de forma, uma propriedade que se traduz na capacidade que estas ligas têm de recuperar a sua configuração original, após sofrerem deformações, através de um ciclo de aquecimento. Esta capacidade torna possível a produção de movimento e força, ou seja, a realização de trabalho, factor determinante na utilização como actuador.

Neste trabalho foi instalado um *setup* experimental com o propósito de estudar o controlo da variável força, produzida por um fio de liga com memória de forma durante a sua mudança de fase. Para tal foram utilizados algoritmos de controlo implementados em LabVIEW™, uma linguagem de programação gráfica. O controlo é baseado nas acções de controlo proporcional-integral-derivativo (PID), estudando-se a sensibilidade do controlador à variação dos parâmetros de controlo, por forma a obter uma resposta o mais optimizada possível.

O objectivo desta dissertação é o estudo da viabilidade de aplicação deste tipo de material sob a forma de um controlador, seguindo uma estratégia de *design* para este. Para tal foi implementado o controlador e estudado num *setup* experimental, podendo posteriormente ser aplicado num modelo a uma escala reduzida de um elemento de fachada.

## Palavras chave:

Actuadores; Ligas com memória de forma; Efeito de memória de forma; Controlo PID.



# Abstract

The shape memory alloys (SMAs) exhibit unique properties in the field of engineering, particularly in civil engineering and therefore are object of interest in many areas of study. The shape memory effect enables the application of SMAs as actuators, enabling this kind of alloys to recover its initial configuration after being largely deformed, upon a heating cycle. This property makes it possible to produce movement and force, resulting in work done by the SMA, condition required to operate as an actuator.

In this work is developed an experimental setup to control the force variable of a SMA wire during its phase transformation. To control these variables, control algorithms developed in LabVIEW are used. The controller resort to Proportional-Integral-Derivative (PID) control actions, studying the sensibility of the controller to the variation of the constants associated with each type of control action, in order to obtain an optimized response.

The objective of the present dissertation is to study the feasibility of SMAs application as actuators, following a design strategy. For this, the controller was studied in an experimental setup and could be used in a scaled down model of a glass façade.

## Keywords:

Actuators; Shape memory alloys (SMAs); Shape memory effect; PID control.



# Índice de Matérias

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações gerais . . . . .	1
1.2 Objectivos do trabalho . . . . .	2
1.3 Organização do trabalho . . . . .	2
<b>2 Ligas com memória de forma</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução . . . . .	3
2.2 Breve resumo histórico . . . . .	4
2.3 Características gerais . . . . .	4
2.4 Transformação de fase martensítica . . . . .	5
2.5 Efeito de memória de forma . . . . .	7
2.6 Efeito superelástico . . . . .	8
<b>3 Estado da arte</b>	<b>11</b>
3.1 Introdução . . . . .	11
3.2 Aplicações das ligas com memória de forma . . . . .	11
3.2.1 Modos de aplicação . . . . .	11
3.2.2 Áreas de aplicação . . . . .	14
<b>4 Estratégia de <i>design</i> e controlo</b>	<b>25</b>
4.1 Introdução . . . . .	25
4.2 <i>Design</i> do actuador . . . . .	25
4.2.1 Conceitos gerais . . . . .	25
4.2.2 Método de activação . . . . .	25
4.2.3 Tipo de actuador . . . . .	26
4.2.4 Limitações . . . . .	27
4.2.5 Temperatura operacional . . . . .	27
4.2.6 Geometria do modelo real . . . . .	28

4.3	Configuração experimental . . . . .	31
4.4	Teoria de controlo . . . . .	34
4.4.1	Acções de controlo . . . . .	36
4.4.2	Critérios de desempenho do controlo . . . . .	40
4.4.3	Calibração do controlador . . . . .	43
4.5	<i>Software e hardware</i> de controlo . . . . .	44
4.5.1	<i>Software</i> de controlo . . . . .	44
4.5.2	<i>Hardware</i> de controlo . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Resultados experimentais</b>	<b>49</b>
5.1	Introdução . . . . .	49
5.2	Intervalo operacional . . . . .	49
5.3	Calibração dos parâmetros de controlo . . . . .	50
5.3.1	Calibração para o controlo da força . . . . .	50
5.4	Influência dos ganhos na resposta de controlo . . . . .	54
5.4.1	Função em degrau . . . . .	54
5.4.2	Função sinusoidal . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>65</b>

# Índice de Figuras

2.1	Diagrama esquemático da transformação de fase martensítica. . . . .	6
2.2	Diagrama de Extensão-Tensão-Temperatura das ligas com memória de forma. . . . .	7
2.3	Diagrama de Tensão-Extensão típico das ligas com memória de forma com temperatura abaixo de $A_f$ (Efeito de memória de forma). . . . .	8
2.4	Mecanismo do efeito de memória de forma. . . . .	8
2.5	Diagrama de Tensão-Extensão típico das ligas com memória de forma com temperatura acima de $A_f$ (Efeito superelástico). . . . .	9
2.6	Mecanismo do efeito superelástico. . . . .	10
3.1	Filtro de coágulo sanguíneo. . . . .	12
3.2	Ligação de um tubo hidráulico. . . . .	12
3.3	Esquema de um fio de SMA utilizado como actuador. . . . .	13
3.4	Actuador Pinpuller. . . . .	13
3.5	Arco ortodôntico composto por NiTi. . . . .	14
3.6	Implantação experimental de um Nitinol <i>stent</i> em vasos simulados em silicone antes e depois da actuação. . . . .	15
3.7	Placa de NiTi para uma fractura no maxilar inferior; grampo antes e depois da sua posição operacional; espaçador de vértebras. . . . .	16
3.8	Corte no modelo da asa com o tubo de torção implementado (a preto). . . . .	16
3.9	<i>Chevron</i> de geometria variável num avião Boeing; Implementação de barras de SMA num <i>chevron</i> . . . . .	17
3.10	Diferentes disposições de elementos de contraventamento com dissipadores SMA em edifício de seis pisos. . . . .	18
3.11	Dispositivo proposto por Dolce et al. . . . .	18
3.12	Elementos de SMA dissipadores de energia aplicados em pontes. Adaptado de [3, 9, 37].	19
3.13	Exemplo de conectores em zonas críticas com o auxílio de varões de SMA. Adaptado de [37]. . . . .	20
3.14	Torre de S. Giorgio, Itália, e esquema da intervenção. Adaptado de [21]. . . . .	20
3.15	Deformações impostas por uma solicitação sísmica numa estrutura de base fixa (esquerda) e base isolada (direita). . . . .	21
3.16	Esquema do sistema de isolamento de base implementando fios de SMA proposto por Dolce et al. . . . .	21
3.17	Bloco de borracha com núcleo de chumbo (LRB). . . . .	22
3.18	Modelo da ponte testada por Wilde et al. . . . .	22
3.19	Aplicação de ligas com memória de forma em armações de óculos e tacos de golfe. . . .	23
4.1	Gráfico esquemático de um teste DSC. . . . .	28

4.2	Caracterização termomecânica do fio de NiTi no teste DSC. . . . .	28
4.3	Opção de implementação do controlador 1. Desviadores centrais com 60 cm e restantes com 40 cm. . . . .	29
4.4	Opção de implementação do controlador 2. Desviador central com 60 cm e restantes com 40 cm. . . . .	29
4.5	Opção de implementação do controlador 3. Desviador com 60 cm. . . . .	30
4.6	Opção de implementação do controlador 4. Desviadores com 60 cm. . . . .	30
4.7	Opção de implementação do controlador 5. Desviador com 60 cm. . . . .	30
4.8	Estrutura de suporte do fio de SMA e aparelhos auxiliares. . . . .	32
4.9	Fonte programável de alimentação de corrente eléctrica ao fio de SMA. . . . .	32
4.10	Esquema da configuração experimental para o controlo de deslocamentos. . . . .	33
4.11	Posições indeformada e deformada da mola durante a actuação do fio de SMA. . . . .	33
4.12	Esquema da configuração experimental para o controlo da força. . . . .	34
4.13	Sistema em malha aberta. . . . .	35
4.14	Sistema em malha fechada. . . . .	35
4.15	Varição da resposta com a alteração do valor de $K_p$ para um controlador proporcional. . . . .	38
4.16	Varição da resposta com a alteração do valor de $K_i$ para um controlador proporcional-integral. . . . .	38
4.17	Varição da resposta com a alteração do valor de $K_d$ para um controlador proporcional-integral-derivativo. . . . .	39
4.18	Representação das parcelas de acção de um controlador PID em relação ao erro. . . . .	40
4.19	Função degrau. . . . .	41
4.20	Resposta típica a uma força unitária. . . . .	42
4.21	Resposta em malha aberta de um sistema a uma força unitária. . . . .	43
4.22	Constantes $L$ e $T$ definidas segundo o primeiro método de Ziegler e Nichols. . . . .	44
4.23	Instrumento virtual DAQ Assistant Express. . . . .	45
4.24	Instrumento virtual Simulate Signal. . . . .	45
4.25	Instrumentos virtuais (a) PID e (b) Setpoint Profile. . . . .	46
4.26	Exemplo de patamares definidos no instrumento virtual PID Setpoint Profile e o gráfico da função resultante. . . . .	46
4.27	Diagrama de bloco da rotina de controlo da força de actuação. . . . .	47
5.1	Relações entre (a) voltagem e temperatura e (b) voltagem e força. . . . .	49
5.2	Resposta a 2,5 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	50
5.3	Resposta a 3,0 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	51
5.4	Resposta a 3,5 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	51
5.5	Resposta a 4,0 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	51
5.6	Resposta a 4,5 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	51
5.7	Resposta a 5,0 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	52
5.8	Resposta a 5,5 V em malha aberta para calibração em termos de força. . . . .	52
5.9	Resposta P, PI e PID com parâmetros calibrados pelo primeiro método de Ziegler e Nichols. . . . .	53
5.10	Resposta para diferentes valores de $K_p$ . . . . .	54
5.11	Resposta para diferentes valores de $T_i$ ( $K_p = 1$ ). . . . .	55
5.12	Evolução da resposta para diferentes valores de $T_i$ ( $K_p = 1$ ). . . . .	56
5.13	Resposta para diferentes valores de $T_d$ ( $K_p = 1$ e $T_i = 0.03$ ). . . . .	56
5.14	Diminuição do força, consequência do arrefecimento, ao longo do tempo. . . . .	57
5.15	Resposta de controlo para uma função sinusoidal variando $K_p$ . . . . .	58

5.16	Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com $K_p = 0.5$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	60
5.17	Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com $K_p = 1.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	60
5.18	Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com $K_p = 5.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	61
5.19	Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com $K_p = 10.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	61
5.20	Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com $K_p = 5.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	62



# Índice de Tabelas

2.1	Comparação entre as ligas de NiTi e o aço estrutural tradicional. . . . .	5
3.1	Características gerais dos actuadores Pinpuller da empresa TiNi Aerospace. . . . .	13
4.1	Características técnicas do tipo de fio escolhido especificadas pelo fabricante. . . . .	27
4.2	Comparação entre as várias opções dos valores teóricos da contra-flecha. . . . .	31
4.3	Resumo da regra de calibração proposta por Ziegler e Nichols no primeiro método. . . . .	44
5.1	Valores para a calibração do controlo da força. . . . .	52
5.2	Critérios de desempenho do controlo P, PI e PID. . . . .	53
5.3	Critérios de desempenho para diferentes valores de $K_p$ . . . . .	54
5.4	Critérios de desempenho para diferentes valores de $T_i$ ( $K_p = 1$ ). . . . .	55
5.5	Critérios de desempenho para diferentes valores de $T_d$ ( $K_p = 1$ e $T_i = 0.03$ ). . . . .	57
5.6	Erro quadrático médio e erro máximo da resposta de controlo para uma função sinusoidal variando $K_p$ . . . . .	59
5.7	Erro quadrático médio e erro máximo com $K_p = 0.5$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	60
5.8	Erro quadrático médio e erro máximo com $K_p = 1.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	60
5.9	Erro quadrático médio e erro máximo com $K_p = 5.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	61
5.10	Erro quadrático médio e erro máximo com $K_p = 10.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	61
5.11	Erro quadrático médio e erro máximo com $K_p = 5.0$ e $T_i = 0.01$ . . . . .	62



# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

## Abreviaturas

DAQ	Sistema de aquisição de dados (do inglês <i>Data acquisition</i> )
DSC	Calorímetro diferencial de varredura (do inglês <i>Differential Scanning Calorimeter</i> )
EUA	Estados Unidos da América
NiTiNOL	<i>Nickel Titanium - Naval Ordnance Laboratory</i>
P	Controlo proporcional
PI	Controlo proporcional-integral
PID	Controlo proporcional-integral-derivativo
SMA	Liga com Memória de Forma (do inglês <i>Shape Memory Alloy</i> )

## Siglas

ASM	<i>American Society for Metals</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
UNL	Universidade Nova de Lisboa

## Símbolos

$A_f$	Temperatura de fim da transformação para a fase austenítica
$A_s$	Temperatura de início da transformação para a fase austenítica
$K_d$	Ganho derivativo
$K_i$	Ganho integral
$K_p$	Ganho proporcional

$L$	Tempo de atraso
$M_f$	Temperatura de fim da transformação para a fase martensítica
$M_s$	Temperatura de início da transformação para a fase martensítica
$T$	Constante temporal
$T_d$	Tempo derivativo
$T_i$	Tempo integral

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações gerais

Desde a sua descoberta que os metais se ligam intimamente à evolução das civilizações, através da evolução das suas próprias técnicas de extração, fabricação, fundição e tratamento. Esta ligação é de tal forma forte que existem períodos da história do homem denominados segundo a matéria prima emergente usada para a fabricação de ferramentas e armas, como são exemplo as Idades do Cobre, do Bronze e do Ferro.

Nos últimos séculos os metais representam uma fatia significativa e importante dos materiais estruturais. Com o desenvolvimento do conhecimento sobre o seu comportamento, das tecnologias e técnicas de produção, aprimoraram-se as suas capacidades e propriedades, alargando o leque de aplicações ao dispor dos engenheiros para os metais.

Na perspectiva da engenharia existe sempre a necessidade de desenvolver elementos o mais leves, resistentes, simples, com propriedades rigorosas e "à medida" do projecto. Para além disto, mais recentemente existe um interesse especial em materiais capacitados para funções especiais. Este último aspecto engloba os materiais denominados de activos, capazes de serem implementados sob a forma de actuadores, na conversão de um sinal não-mecânico (como uma corrente eléctrica) numa resposta mecânica, como uma força ou um movimento, ou na associação destas duas em trabalho.

As ligas com memória de forma<sup>1</sup> integram este grupo dos materiais activos, tirando partido do efeito de memória de forma. Este efeito permite a alteração da forma de um elemento composto por estas ligas, pela aplicação de um diferencial de temperatura. As suas propriedades mais relevantes podem ser optimizadas consoante a aplicação a que se destinam, reservando por isto um lugar de destaque nos novos desenvolvimentos tecnológicos numa vasta gama de áreas, nomeadamente na engenharia.

A intersecção destes dois elementos, as ligas com memória de forma e os actuadores, é feita maioritariamente em sistemas de controlo activo de estruturas, tanto em sistemas de auto-reabilitação estrutural como em sistemas de controlo da frequência de estruturas. Neste trabalho procura-se uma abordagem mais perto deste último campo, mas em torno do controlo e minimização das deformações em elementos de uma fachada de vidro.

---

<sup>1</sup>Ao longo deste documento será utilizada por vezes a abreviatura SMA (do inglês *Shape Memory Alloys*) para substituir o termo ligas com memória de forma.

## 1.2 Objectivos do trabalho

Neste trabalho será desenvolvido e estudado um controlador que actua pela activação eléctrica de um elemento de liga com memória de forma. O controlo será do tipo proporcional-integral-derivativo e será testada a sua sensibilidade à variação dos parâmetros de controlo, assim como a adequação da sua resposta a vários tipos de sinais de referência (impulsos, ondas sinusoidais, patamares, etc.).

Pretende-se portanto otimizar os parâmetros de controlo deste controlador em particular e perceber a influência destes a um nível mais geral, assim como determinar a viabilidade deste controlador para cada um dos sinais de referência (*input*).

## 1.3 Organização do trabalho

Neste primeiro capítulo pretende-se explicar simplificadaamente alguns pontos importantes no âmbito desta dissertação e definir os objectivos da mesma.

O segundo capítulo aborda de forma transversal as ligas com memória de forma, deste a sua evolução até aos fundamentos teóricos necessários à compreensão das suas propriedades e características especiais e, conseqüentemente, o seu comportamento. Este capítulo procura sustentar a base teórica presente nos capítulos seguintes, abordando conceitos essenciais.

O terceiro capítulo resume os principais modos de aplicação das ligas com memória de forma, assim como as diversas áreas em que se têm experienciado casos de sucesso na sua implementação. Relacionam-se ainda os conceitos abordados no segundo capítulo com as realidades práticas da sua aplicação.

No quarto capítulo fundamentam-se as escolhas efectuadas ao nível do *design* do actuador, descreve-se o *setup* experimental utilizado no estudo e calibração do controlo e explicam-se os conceitos por detrás da teoria de controlo.

No quinto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos para a calibração do controlador, no estudo da sensibilidade e optimização dos parâmetros de controlo e para a eficácia do controlador na resposta em vários sinais de referência.

O capítulo seis expõe em síntese as conclusões mais importantes desta dissertação e propõe desenvolvimentos futuros no seguimento deste trabalho.

## Capítulo 2

# Ligas com memória de forma

### 2.1 Introdução

As ligas com memória de forma demarcam-se dos restantes materiais utilizados em engenharia uma vez que possuem duas propriedades especiais, o efeito de memória de forma e a superelasticidade. O efeito de memória de forma traduz-se na capacidade que estas ligas têm de recuperar a sua configuração original, após sofrerem deformações, através de um ciclo de aquecimento até uma temperatura crítica [5, 33]. Neste ciclo, estas ligas exercem uma grande força ao tentarem readquirir a sua forma original. É esta força, aliada à recuperação da forma original, que permite a utilização das ligas com memória de forma como actuadores, tirando partido do trabalho produzido (produto entre a força e o deslocamento) [5, 13]. A superelasticidade (também conhecida como pseudoelasticidade) permite ao material recuperar de amplas deformações não-lineares (extensões até 8%) sem deformações residuais, quando sujeito a ciclos de carga e descarga. Isto deve-se à capacidade do material desenvolver um ciclo histerético<sup>1</sup> que lhe permite dissipar energia [5, 33].

Estas ligas apresentam tais propriedades como consequência de exibirem uma transformação de fase denominada de martensítica. A transformação de fase martensítica ocorre entre duas fases sólidas do material, na qual os átomos são rearranjados numa nova estrutura cristalina, apesar de se manter a composição química. As fases presentes nesta transformação são a austenite (ou fase austenítica) e a martensite (ou fase martensítica) [17, 33].

Para além destas suas características únicas, estas ligas possuem ainda uma elevada resistência à corrosão e à fadiga, assim como uma grande capacidade de amortecimento [6, 32]. Este conjunto de características potenciam o seu interesse crescente de aplicação em diversas áreas da engenharia, em particular no que toca à sua utilização sob a forma de actuadores e ao estudo da sua eficácia e viabilidade quando aplicados a problemas de engenharia civil.

Estes aspectos ligados à materialização das potencialidades dos SMA em aplicações práticas e concretas será alvo de análise no capítulo 3. No presente capítulo serão introduzidos e desenvolvidos os conceitos teóricos e os fenómenos por detrás das propriedades únicas que estes materiais apresentam.

---

<sup>1</sup>O ciclo histerético resulta do facto da energia absorvida durante o carregamento ser superior à libertada durante a descarga, dissipando-se a energia remanescente sob a forma de calor.

## 2.2 Breve resumo histórico

A evolução histórica deste material, desde a descoberta das ligas com memória de forma até à sua crescente utilização na actualidade, teve como ponto de partida a descoberta de uma fase martensítica em aços, na década de 1890, por Adolf Martens, um metalúrgico alemão. A transformação martensítica foi talvez o fenómeno metalúrgico mais estudado durante a primeira década do século XX, quando era julgado um processo irreversível, através de observações em ligas de ferro e carbono (FeC), ou seja, de aço [23]. Em 1932 o físico Arne Ölander observou pela primeira vez os fenómenos do efeito de memória de forma e da superelasticidade em ligas de ouro e cádmico (AuCd), no seu estudo intitulado *rubber like effect*. No ano de 1938 Greninger e Mooradian efectuaram um estudo semelhante com ligas de cobre e zinco (CuZn), ou seja, de latão [7, 33]. A reversibilidade da transformação martensítica foi explicada pela introdução do conceito de termoelasticidade neste fenómeno, no ano de 1949 por Kurdjumov e Khandros, baseando-se no estudo de ligas de latão e também de cobre e alumínio (CuAl). Dois anos depois (1951) Chang e Read, enquanto trabalhavam com ligas AuCd, associaram à reversibilidade térmica desta transformação o termo *shape recovery* (recuperação da forma) pela primeira vez [7, 23].

Apesar do conhecimento da existência destas ligas e dos fenómenos que estas exibem, não houve nenhum desenvolvimento significativo neste campo até ao início da década de 1960. Foi em 1963 que se deu um marco importante no desenvolvimento desta área com a descoberta da capacidade de recuperação da forma em ligas de níquel e titânio (NiTi), pelo investigador e metalúrgico William Buehler. A este fenómeno foi atribuído o termo de efeito de memória de forma, o que originou a conotação das ligas que exibem este efeito como ligas com memória de forma. Este tipo de ligas, nas quais se basearam as observações de Buehler, foi cunhado com o nome NiTiNOL, associando a composição de níquel e titânio destas (NiTi) ao *Naval Ordnance Laboratory* (NOL), local onde decorreram as observações que culminaram na descoberta anteriormente referida. A partir deste momento deu-se um crescente interesse sobre SMAs e produziu-se densa investigação sobre este tipo de material, nomeadamente no que toca aos aspectos que influenciam a sua produção, composição e estrutura microscópica, consolidando bastante os conhecimentos sobre este tema [7, 23]. Apesar das potencialidades destas ligas serem desde logo compreendidas, em especial as constituídas por NiTi, as dificuldades práticas e técnicas associadas à sua produção apenas foram superadas eficazmente já na década de 90, atrasando a sua utilização e comercialização.

Outro aspecto que importa referir é o custo relativamente elevado associado à produção deste tipo de ligas, devido à complexidade e aos padrões de qualidade elevados do seu fabrico, que é tido em consideração na análise económica da sua aplicação. Assim se entende ainda mais facilmente o atraso no desenvolvimento e utilização deste tipo de ligas. A relevância deste facto tem vindo a ser minorada com a diminuição do preço de produção destes materiais nos últimos anos, motivada pelo desenvolvimento a nível técnico da sua produção e pela sua aceitação e disseminação da sua utilização, dadas as propriedades com enorme interesse [30].

## 2.3 Características gerais

As ligas metálicas, num sentido geral, são materiais compostos por mais que um elemento em que pelo menos um destes é um metal, tipicamente constituídas por dois elementos, as ligas binárias, ou por três no caso das ligas ternárias. No sentido prático, as ligas com memória de forma encontram-se quase

## 2.4. TRANSFORMAÇÃO DE FASE MARTENSÍTICA

---

limitadas a três tipos de ligas: as ligas de níquel e titânio (NiTi), as ligas de cobre (Cu) e as ferrosas (Fe). Dentro destas as mais comuns são as ligas de Cobre-Alumínio-Níquel (CuAlNi), Cobre-Zinco-Alumínio (CuZnAl), Ferro-Magnésio-Silício (FeMn[Si]), Magnésio-Cobre (MnCu), Níquel-Titânio (NiTi) e Níquel-Titânio-Nióbio (NiTiNb) [14, 33, 35].

Destaca-se, para aplicações em engenharia civil, a liga de NiTi (composta por 53 a 57% de níquel em termos de massa) já referida anteriormente, uma vez que apresenta excelente resistência à corrosão, em comparação com as ligas à base de cobre que são sensíveis à humidade, sendo esta uma característica de extrema importância neste tipo de aplicações, muitas vezes sobre a acção directa de agentes climáticos como a chuva e a humidade.

Em seguida, na tabela 2.1, apresentam-se algumas das propriedades de interesse das ligas de NiTi em comparação com um material típico em engenharia civil, o aço estrutural tradicional.

Tabela 2.1: Comparação entre as ligas de NiTi e o aço estrutural tradicional. Adaptado de [33].

Propriedade	NiTi	Aço
Densidade ( $g/cm^3$ )	6.45	7.85
Módulo de elasticidade (GPa)	30-83 (Austenite); 21-41 (Martensite)	200
Tensão de cedência (MPa)	195-690 (Austenite); 70-140 (Martensite)	248-517
Tensão de rotura (MPa)	895-1900	448-827
Extensão última (%)	5-50	20
Extensão reversível (%)	8.0	0.2
Comportamento à corrosão	Excelente (similar a aço inoxidável)	Razoável

## 2.4 Transformação de fase martensítica

As propriedades superelásticas e de memória de forma encontradas nestas ligas tornam-se possíveis devido a uma transformação de fase que ocorre no estado sólido, na qual se dá um rearranjo dos átomos para uma estrutura cristalina nova, mas com composição química idêntica à inicial. Esta transformação é denominada de transformação de fase martensítica, podendo-se observar um diagrama esquemático na figura 2.1.

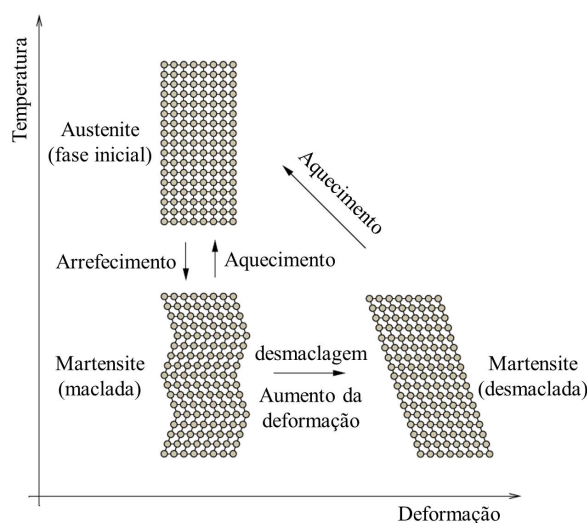


Figura 2.1: Diagrama esquemático da transformação de fase martensítica. Adaptado de [33].

Na transformação de fase martensítica dá-se a alteração do material de uma fase auténica para uma fase martensítica, podendo ser induzida através da aplicação de tensões ou da variação de temperatura. A fase inicial, ou usualmente no inglês *parent phase*, caracteriza-se por ser estável para baixos níveis de tensões ou altas temperaturas, por um elevado módulo de elasticidade e por uma estrutura cristalina cúbica ou isométrica, altamente simétrica, ou de forma mais simplista uma estrutura mais ordenada. O seu nome foi cunhado como homenagem ao metalúrgico inglês William Chandler Austen, podendo ser designada por austenite ou austenita em complemento à denominação de fase austenítica. A fase martensítica é caracterizada pela sua estabilidade a níveis elevados de tensão ou baixas temperaturas, pelo baixo módulo de elasticidade e por uma estrutura cristalina monoclinica, menos ordenada, e pouco simétrica [7, 14, 33, 35].

Ao contrário da maioria dos materiais, como por exemplo o aço, na transformação de fase martensítica os materiais não se deformam por deslizamentos e deslocamentos internos irreversíveis. A transformação ocorre sem a difusão dos átomos (movimentos relativamente grandes dos átomos em relação à malha/estrutura cristalina), mas sim através de um movimento cooperativo e homogêneo de vários átomos, numa ordem de grandeza inferior às da estrutura cristalina. Por isto é uma transformação de fase quase instantânea, para além de poder ocorrer a temperaturas baixas onde a mobilidade dos átomos é geralmente muito baixa. Importa ainda referir que esta mudança de fase não implica alterações a nível macroscópico no material, ocorrendo a um nível microscópico [7, 17, 33].

O arrefecimento do material, sem a aplicação de tensões, fá-lo passar da fase austenítica à fase martensite maclada (do inglês *twinned*), podendo-se reverter a transformação de fase pelo aquecimento do material. Na fase martensite maclada a estrutura cristalina do material tenta atingir a energia potencial mínima para uma dada temperatura, obtendo uma estrutura em macla ou geminada em que os deslocamentos dos átomos ocorrem com simetria espelhada [7].

O processo induzido pela variação da temperatura é caracterizado por quatro temperaturas críticas.  $M_s$  e  $M_f$  são as temperaturas correspondentes ao início (*start*) e ao fim (*finish*) da transformação de austenite para martensite, durante o arrefecimento do material, com  $M_s > M_f$ . As temperaturas  $A_s$  e  $A_f$  correspondem, analogamente às duas anteriores, ao início e ao fim, deste vez, da transformação inversa

e durante o aquecimento do material, com  $A_s < A_f$ . É importante ainda mencionar que acima do valor de  $A_f$  a fase martensítica torna-se completamente instável e que existe outra temperatura a referir,  $M_d$ , que é o limite superior acima do qual esta mesma fase não consegue ser induzida através da aplicação de tensões [7, 33].

Durante a fase martensite maclada a aplicação de um carregamento mecânico pode levar à fase martensite desmaclada (do inglês *detwinned*) num processo denominado de desmaclagem (do inglês *detwinning*), no qual se dá uma reorientação da estrutura cristalina do material. Este processo resulta na retenção da configuração macroscópica deformada do elemento após a descarga inicial. Este processo pode ser revertido, da fase martensite desmaclada para a fase austenítica, se o elemento de SMA for aquecido a uma temperatura superior a  $A_f$ , recuperando totalmente a sua configuração. A este processo é denominado de efeito de memória de forma, que será analisado em maior detalhe na secção 2.5 [23].

Esta secção pode ser resumida na figura 2.2, onde são apresentadas as alterações induzidas neste tipo de ligas durante a transformação de fase martensítica, tanto pela aplicação de tensões como pela variação da sua temperatura.

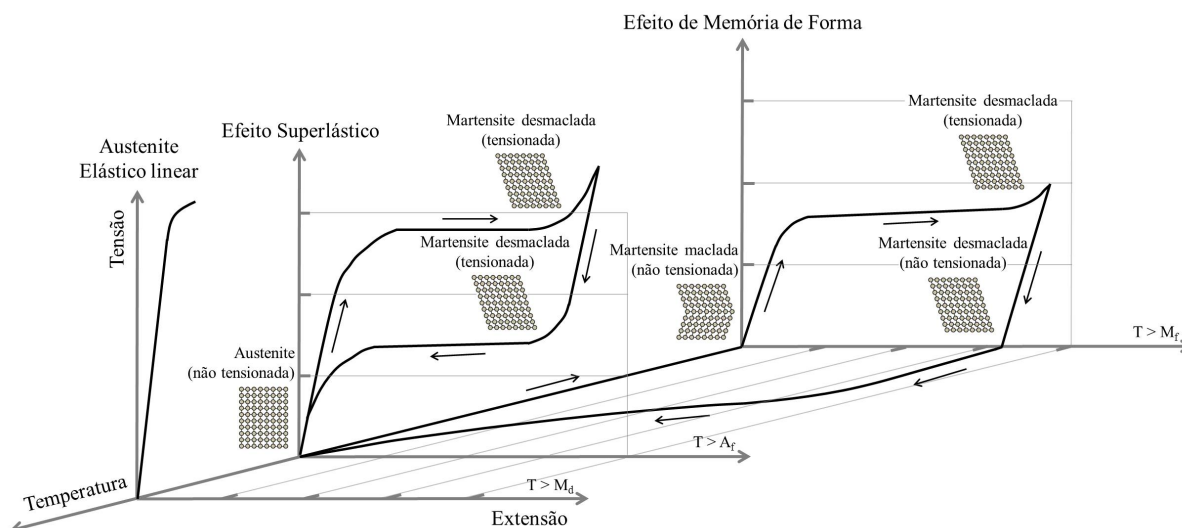


Figura 2.2: Diagrama de Extensão-Tensão-Temperatura das ligas com memória de forma. Adaptado de [8, 10, 33].

## 2.5 Efeito de memória de forma

Quando um esforço uniaxial é aplicado à fase martensite maclada existe um valor crítico ( $a$ ), representado na figura 2.3, a partir do qual o processo de desmaclagem ocorre, sendo precedido por uma deformação elástica. O processo de desmaclagem consiste na reorientação espacial dos cristais da estrutura cristalina, de acordo com a direcção de aplicação do esforço ao elemento. Durante este processo existe um patamar ( $a-c$ ) de tensões quase constantes, até a martensite se encontrar completamente na fase desmaclada, ou seja, até ao fim do processo de desmaclagem ( $c$ ). Já na fase martensite maclada o contínuo carregamento do material leva a deformações elásticas ( $c-d$ ), ocorrendo uma descarga também elástica se o esforço deixar de ser aplicado antes de atingido o ponto ( $d$ ). Este descarregamento até tensões nulas resulta em

elevadas deformações residuais que podem ser recuperadas através do aquecimento do material a uma temperatura superior a  $A_f$ , voltando o material à fase austenítica. Este fenómeno de recuperação da sua forma inicial é denominado de efeito de memória de forma. Se for atingido o ponto ( $d$ ) as deformações entram num patamar plástico e não poderão ser recuperadas na sua totalidade [14, 17, 33].

A resposta à aplicação de esforços típica de uma liga de memória de forma, em termos de tensões e extensões, é apresentada no diagrama seguinte, na figura 2.3.

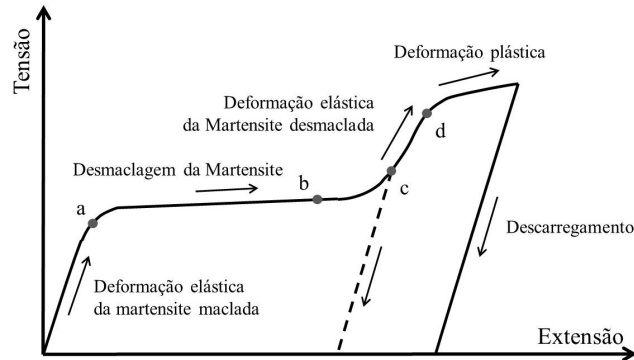


Figura 2.3: Diagrama de Tensão-Extensão típico das ligas com memória de forma com temperatura abaixo de  $A_f$  (Efeito de memória de forma). Adaptado de [33].

O efeito de memória de forma a um nível microscópico, ou seja, a sua alteração na estrutura cristalina das ligas com memória de forma durante a transformação de fase, é apresentado na figura 2.4.

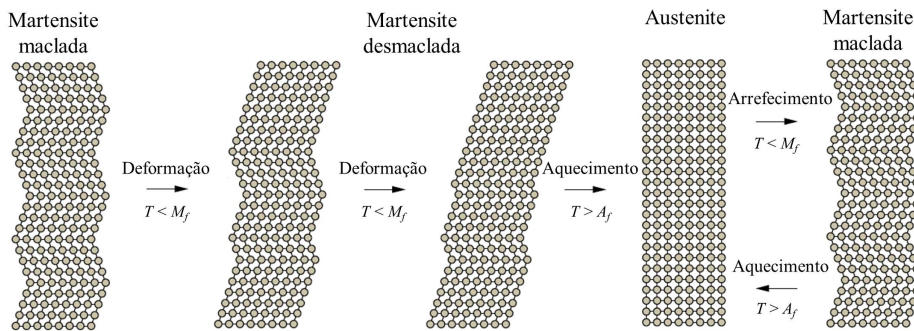


Figura 2.4: Mecanismo do efeito de memória de forma. Adaptado de [33].

## 2.6 Efeito superelástico

Quando um esforço uniaxial é aplicado numa liga na fase austenítica, com uma temperatura superior a  $A_f$  mas inferior a  $M_d$ , existe um valor crítico ( $a$ ), representado na figura 2.5, a partir do qual ocorre a transformação de austenite para martensite maclada induzida pela aplicação de tensão. Antes deste valor crítico ( $a$ ) dá-se uma distorção elástica na estrutura cristalina da austenite e a partir deste valor a austenite torna-se instável. À medida que a deformação continua em condições isotérmicas, a tensão

## 2.6. EFEITO SUPERELÁSTICO

mantém-se quase constante até a transformação se dar completamente ( $a-b$ ), coexistindo neste patamar as fases austenítica e martensite desmaçada. Até ao ponto ( $c$ ) ocorrem deformações elásticas da martensite desmaçada durante o carregamento e uma descarga também elástica da martensite desmaçada em caso de descarregamento ( $b-c'$ ). Dá-se uma transformação inversa, a partir do ponto ( $c'$ ) durante a descarga, uma vez que a martensite é instável sem a aplicação de um valor crítico de tensões, a temperaturas superiores a  $A_f$ , revertendo completamente à fase austenítica no ponto ( $d'$ ). Neste caso o patamar de tensões ( $c'-d'$ ) é inferior àquele observado durante o carregamento ( $a-b$ ), dando origem à formação de um efeito histerético no ciclo de carga e descarga. Caso a temperatura se mantenha acima do valor de  $A_f$  as deformações são completamente recuperadas no final do descarregamento, seguindo a curva inicial de carregamento a partir do ponto ( $d'$ ). Este processo traduz a capacidade de absorção de energia destes materiais sem deformações residuais e é denominado de superelasticidade. Se a temperatura do material descer abaixo de  $A_f$  apenas parte da martensite desmaçada se transforma novamente em austenite, resultando em deformações residuais no final da descarga, que podem ser recuperadas através do aquecimento do material a uma temperatura superior a  $A_f$ . Este último fenómeno é geralmente referido como superelasticidade parcial. Se o carregamento ultrapassar o ponto ( $c$ ) ocorrem deformações plásticas não recuperáveis na martensite e caso as deformações persistam o elemento pode mesmo atingir a rotura [14, 17, 33].

Os processos mencionados acima são apresentados no diagrama da figura 2.5.

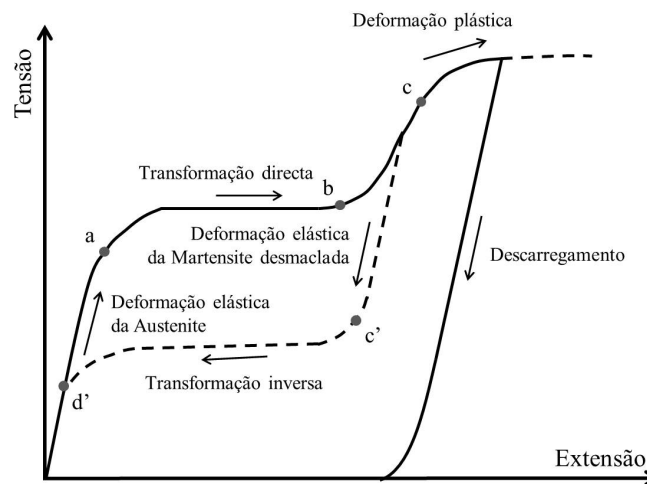


Figura 2.5: Diagrama de Tensão-Extensão típico das ligas com memória de forma com temperatura acima de  $A_f$  (Efeito superelástico). Adaptado de [33].

O efeito superelástico a um nível microscópico, ou seja, a sua alteração na estrutura cristalina das ligas com memória de forma durante a transformação de fase, é apresentado na figura 2.6.

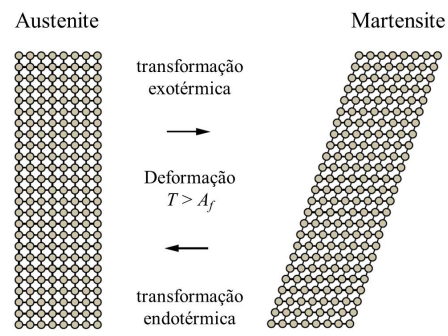


Figura 2.6: Mecanismo do efeito superelástico. Adaptado de [33].

## Capítulo 3

# Estado da arte

### 3.1 Introdução

Neste capítulo será feita a apresentação das mais importantes possibilidades de aplicação prática das ligas com memória de forma, assim como serão introduzidos os princípios básicos e aplicações de actuadores. Também se debruçará sobre a utilização das ligas com memória de forma sob a forma de actuadores.

### 3.2 Aplicações das ligas com memória de forma

As propriedades apontadas no capítulo 2 às ligas com memória de forma são únicas de entre os materiais comumente utilizados na área da engenharia, assim como em várias áreas. Desta forma abrem-se novas portas e possibilidades de inovação ligadas à utilização deste tipo de materiais. De modo trivial se entende que as ligas com memória de forma têm um vasto leque de modos de aplicação e, conseqüentemente, variadas áreas em que se torna interessante a sua utilização.

#### 3.2.1 Modos de aplicação

No que diz respeito aos modos de aplicação, podem-se dividir em quatro categorias, que traduzem diferentes formas de tirar partido das características destes materiais. As primeiras três categorias estão directamente relacionadas com o efeito de memória de forma. Estas categorias são: recuperação livre (do inglês *free recovery*), ligada a movimentos livres do elemento; recuperação restringida (do inglês *constrained recovery*), ligada à produção de forças; actuador, ligado à realização de trabalho (movimento e força) e superelasticidade, ligada ao armazenamento de energia.

A primeira categoria (recuperação livre) diz respeito às aplicações cujo elemento de liga com memória de forma recupera a sua configuração original livremente durante o seu aquecimento, gerando-se assim um movimento de recuperação da forma inicial. Este aplicação é utilizada em filtros de coágulos sanguíneos, que são introduzidos no paciente numa forma cilíndrica e compacta e que, com a temperatura interna do paciente, tomam uma configuração funcional em forma de âncora, de modo a captar os coágulos [7, 13].

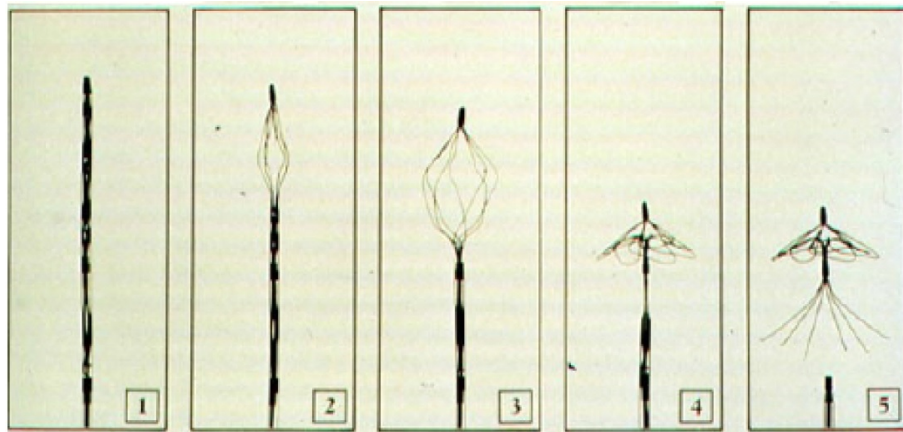


Figura 3.1: Filtro de coágulo sanguíneo [7].

As aplicações ligadas à recuperação restringida são aquelas em que a reaquisição da forma das ligas com memória de forma é impedida por um outro elemento, gerando grandes tensões sobre o elemento que impede o seu movimento. São utilizadas como elementos de fixação, engate e como ligações em tubos hidráulicos. Uma vez que são elementos muito fiáveis, oferecendo maiores garantias que por exemplo um ponto de soldadura, são geralmente utilizados em projectos de grande envergadura e com especial necessidade de diminuição do risco de falhas, como demonstra a sua implementação, em particular, no avião de caça a jacto F-14 em 1971 [7, 13, 23].

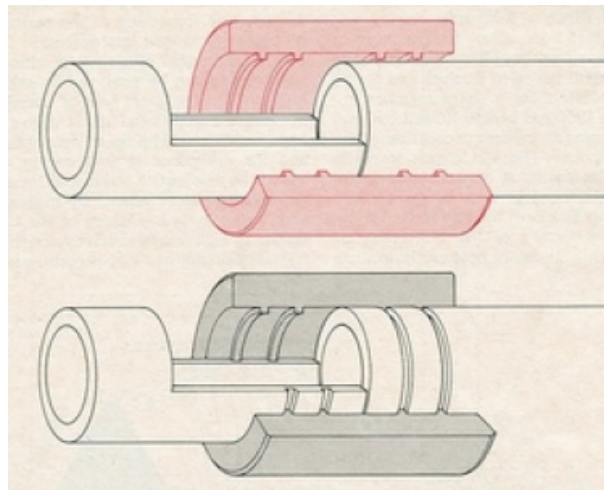


Figura 3.2: Ligação de um tubo hidráulico [7].

No caso dos actuadores é retirado partido da capacidade das ligas com memória de forma têm em gerar movimento (deslocamento) e força, produzindo trabalho durante o seu aquecimento, que pode também ser induzido por corrente elétrica [13]. Este modo de aplicação pode ser esquematizado, de um modo simplista, na figura 3.3, onde um fio de SMA activado por corrente eléctrica levanta uma massa.

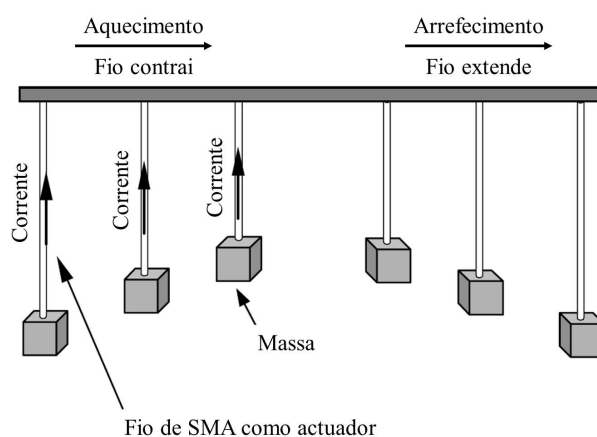


Figura 3.3: Esquema de um fio de SMA utilizado como actuador. Adaptado de [36].

A sua aplicação mais comum é em dispositivos *on/off* como são exemplo válvulas, interruptores, dispositivos de aperto e sistemas de detecção de fogo, geralmente ligados a instrumentos de segurança. Funcionam através da alteração da sua forma por actuação térmica ou eléctrica (que induz um aquecimento), sendo projectados para temperaturas operacionais específicas [7, 17].

Existe grande vantagem na utilização das ligas com memória de forma sob a forma de actuadores uma vez que são bastante simples, compactos e seguros, operando de forma limpa e silenciosa. São ainda elementos com grandes relações entre a força produzida e o seu peso/volume, apresentando-se na figura 3.4 um exemplo de actuador Pinpuller da empresa TiNi Aerospace utilizado geralmente em veículos espaciais devido à sua fiabilidade [17]. Este actuador em particular funciona pela actuação de uma cavilha de engate representada a cinzento. Quanto às características destes actuadores, estas estão resumidas na tabela 3.1 para os modelos menor e maior- [42].

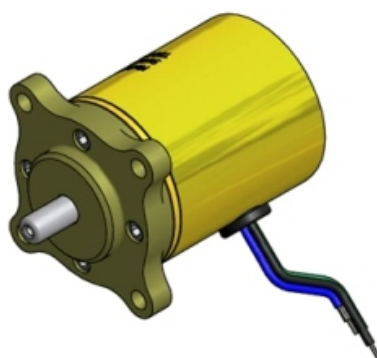


Figura 3.4: Actuador Pinpuller [42].

Tabela 3.1: Características gerais dos actuadores Pinpuller da empresa TiNi Aerospace [42].

Modelo	Força (N)	Deslocamento (mm)	Massa (g)	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
P5	22	6.3	30	3.2	2.4
P100	445	15.9	360	8.25	4.5

A superelasticidade traduz-se em recuperações de deformações elásticas muito amplas com a capacidade de armazenamento/dissipação de energia. Dentro destas quatro categorias é a única que pressupõe uma aplicação em condições isotérmicas, estando por isso limitada a um intervalo de temperatura onde é funcional, entre  $A_s$  e  $M_d$  [2, 7, 13].

### 3.2.2 Áreas de aplicação

As potencialidades na aplicação das ligas com memória são bem vindas, de forma bastante transversal, em inúmeras indústrias, uma vez que as suas características únicas possibilitam a resolução de problemas de formas inovadoras. Deste modo, são várias as áreas onde este material tem vindo a assumir um papel muito relevante, através de aplicações inovadoras que resultam no desenvolvimento de novos produtos e até mesmo em grandes avanços de certas indústrias.

Nesta secção serão apresentadas algumas áreas onde as ligas com memória de forma tomaram uma importância significativa, através de um resumo dos exemplos práticos de aplicações que exploram as características deste material em cada uma das áreas.

#### Medicina

Para além das características que já foram referidas, as ligas com memória de forma possuem ainda uma enorme mais valia no que toca às aplicações médicas, que é a sua biocompatibilidade<sup>1</sup>, no caso concreto das ligas de NiTi [23].

Nesta área, as aplicações com mais visibilidade no dia-a-dia são as ligadas à ortodontia ou medicina dentária, como os arcos ortodônticos, comumente designados como aparelhos dentários (figura 3.5). Estes aparelhos são utilizados no processo de correcção do posicionamento dos dentes do paciente através da aplicação de forças na denteição. Estas forças são usualmente geradas pela deformação elástica dos fios (constituídos por NiTi) que compõem os aparelhos e pela libertação da energia armazenada sobre a denteição. A vantagem do uso destas ligas nesta prática médica recai na possibilidade de aplicação de forças constantes e moderadas ao longo de um amplo período de tempo, ao contrário de outros materiais como o aço inoxidável [17, 23].



Figura 3.5: Arco ortodôntico composto por NiTi [15].

<sup>1</sup>Este conceito traduz-se na capacidade do material não produzir reacções tóxicas, alérgicas ou inflamatórias durante o seu período funcional no interior do corpo, ao mesmo tempo que o desgaste do meio fisiológico sobre o material é mínimo, permitindo a este funcionar adequadamente durante o seu período de serviço

### 3.2. APLICAÇÕES DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma têm ajudado a solucionar problemas ligados ao sistema cardiovascular, com a introdução de novos instrumentos e métodos de intervenção. Como já foi referido anteriormente, fazem parte destes instrumentos o filtro de coágulos sanguíneos, mas ainda o *stent* (figura 3.6) e um dispositivo que permite tratar um problema denominado de comunicação interatrial (do inglês *atrial septal defect*) no coração. O *stent* é um dispositivo que se caracteriza pela sua estrutura tubular auto-expansível, que é inserido normalmente para ajudar ao suporte das paredes de vasos sanguíneos. Este dois últimos dispositivos são algo semelhantes no modo de aplicação, uma vez que se caracterizam por uma configuração inicial esbelta, proporcionando uma fácil introdução sem a necessidade de cirurgias altamente invasivas, após a qual tomam uma sua configuração operacional, já no local desejado. Esta alteração de forma é induzida por meio térmico [17, 22, 23].

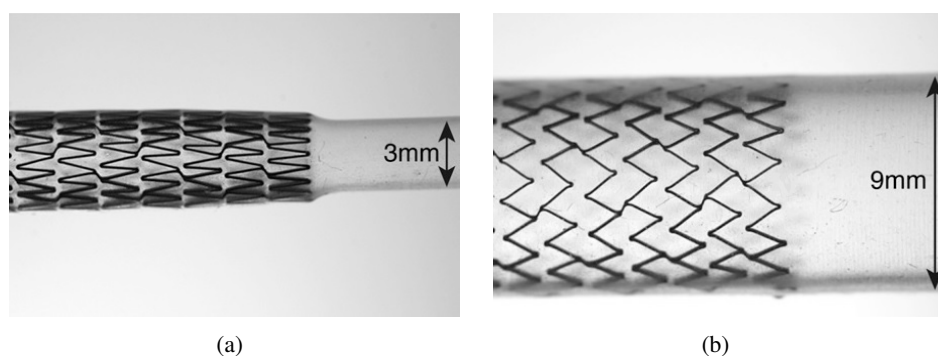


Figura 3.6: Implantação experimental de um Nitinol *stent* em vasos simulados em silicone (a) antes e (b) depois da actuação. Adaptado de [29].

Existem ainda outras aplicações médicas que tiram partido das características das ligas com memória de forma, como em instrumentos cirúrgicos e auxiliares com o intuito de minimizar a intrusão no corpo do paciente, minimizando também os danos colaterais destas intervenções. São exemplo espátulas e fios guia utilizados, os últimos auxiliam a introdução no corpo de um paciente de dispositivos de tratamento ou diagnóstico. Estes fios guia, quando constituídos por estas ligas, tiram partido da superelasticidade para reduzir a probabilidade de ocorrência de dobras permanentes, reduzindo consequentemente o risco de danos durante a retirada do fio do interior do paciente [6, 17, 22, 23].

Estas ligas são ainda utilizadas em aplicações ortopédicas, tanto na recuperação de fracturas sob a forma de placas ou grampos, como no tratamento e correcção de escolioses, em ambos os casos tirando partido da *constrained recovery* (figura 3.7) [22, 23, 31].

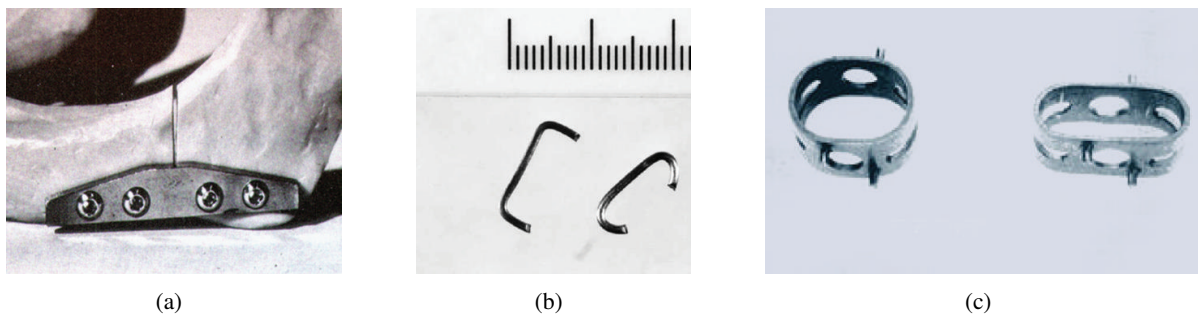


Figura 3.7: (a) Placa de NiTi para uma fractura no maxilar inferior; (b) grampo antes e depois da sua posição operacional; (c) espaçador de vértebras. Adaptado de [31].

### Aeroespacial

As ligas com memória de forma estão fortemente ligadas a uma parte significativa de novos estudos para soluções tecnológicas na área da engenharia aeroespacial, tanto em aeronaves como em naves espaciais. Isto deve-se às suas vantagens inerentes às suas propriedades únicas e que se adequam bastante às necessidades desta área, que se baseiam principalmente na fiabilidade e na eficiência.

Na secção 3.2.1 deram-se já dois exemplos neste sentido, com uma ligação de um tubo hidráulico utilizada num caça a jacto F-14 e actuadores implementados em naves espaciais, apresentando-se em seguida um resumo de outras aplicações.

Foram levados a cabo estudos no sentido de melhorar o desempenho aerodinâmico e de voo em aviões, através da actuação de fios de SMA sobre *ailerons* sem dobradiças, mas também de tubos que funcionam à torção de modo a iniciar uma rotação ao longo das asas, modificando as suas características aerodinâmicas. Estes tubos, apesar de serem eficazes a uma escala reduzida, demonstraram uma resistência mecânica insuficiente à escala real [19].

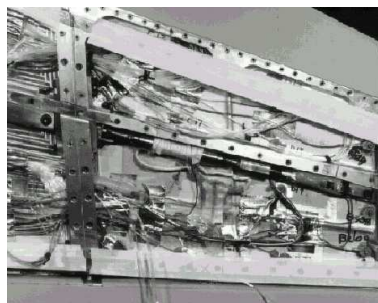


Figura 3.8: Corte no modelo da asa com o tubo de torção implementado (a preto) [19].

Para além das preocupações relacionadas com a eficiência aerodinâmica nos aviões, existem ainda preocupações ao nível da redução dos ruídos provenientes dos motores dos aparelhos, tanto na decolagem como na aterragem, onde se pode também tirar partido das ligas com memória de forma. Uma das

soluções para este problema passa pela utilização de *chevrans* junto aos motores, que redirecionam os seus gases de escape. Durante as decolagens e aterragens os *chevrans* aquecem flectindo-se de modo a reduzir o ruído, enquanto nas zonas de maior altitude e velocidade do aparelho, os elementos de SMA arrefecem, endireitando os *chevrans* e melhorando a performance do aparelho [23].

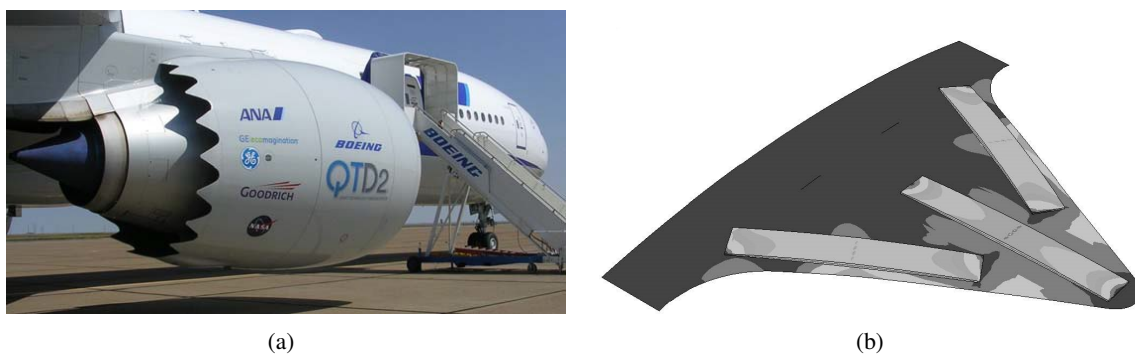


Figura 3.9: (a) *Chevron* de geometria variável num avião Boeing; (b) Implementação de barras de SMA num *chevron*. Adaptado de [19].

Não são apenas as aeronaves que tiram partido das ligas com memória de forma na área da engenharia aeroespacial, mas também as naves espaciais. Nos aparelhos espaciais as principais problemáticas exploradas pela implementação de SMAs são o engate e desengate de peças e mecanismos, a actuação sobre elementos e a redução de vibrações durante a descolagem e aterragem, para além da operacionalidade da instrumentação em ambientes de micro gravidade e vácuo.

#### Engenharia civil

O campo da engenharia civil apresenta também um crescente interesse, principalmente nos últimos anos, na incorporação das ligas com memória de forma como material aplicado em soluções construtivas e de reabilitação de estruturas. Uma problemática sobre a qual se têm incidido grandes esforços, tanto ao nível do estudo como da aplicação prática, é o controlo de vibrações em estruturas devidas a acções dinâmicas. O controlo de vibrações traduz-se na introdução de dispositivos nas estruturas de engenharia civil e podem ser divididos tipos de sistemas: passivos, activos, semi-activos e híbridos.

Os sistemas passivos caracterizam-se por não necessitarem de energia para o seu funcionamento e podem ser implementados segundo duas abordagens diferentes, ou seja, pela dissipação de energia ou pelo isolamento sísmico. Para estes sistemas é tirado partido da elevada capacidade de amortecimento das ligas, podendo ainda, consoante as características da liga escolhida<sup>2</sup>, se obter uma boa capacidade de re-centragem do dispositivo.

A integração de ligas com memória de forma em dispositivos de dissipação de energia já foi feita através de sistemas de contraventamento de estruturas, amortecedores em pontes, ligações entre elementos

<sup>2</sup>A escolha do tipo de liga com memória de forma, neste caso, diz respeito à fase presente na liga durante a sua aplicação. Na fase martensítica estas ligas exibem uma grande capacidade de amortecimento, contudo necessitam de uma fonte externa de calor para readquirirem a sua configuração inicial (fraca capacidade de re-centragem). Na fase austenítica a capacidade de amortecimento destas ligas decresce, mas possuem maiores forças de re-centragem. [37]

estruturais, reforço de elementos e reabilitação de edifícios históricos. O seu princípio de funcionamento baseia-se na minimização das deformações relativas entre elementos estruturais, quando se encontrem solicitados dinamicamente, e consequente diminuição dos esforços instalados. A sua eficácia depende do local da sua instalação, sendo mais eficazes se controlarem os deslocamentos de pontos onde se encontram os máximos deslocamentos modais [30, 37].

Os elementos de contraventamento de estruturas são normalmente instalados diagonalmente entre pisos, podendo a sua configuração variar, apresentando-se na figura 3.10 duas configurações geométricas possíveis, em edifícios de seis pisos. Os elementos de SMA são normalmente utilizados sob a forma de fios e são representados esquematicamente na figura 3.10. Estes elementos foram alvo de diversos estudos por forma a averiguar a sua eficácia, tanto ao nível do amortecimento e minoração de deformações, como à capacidade de re-centragem, sendo esta verificada por diversos autores [30].

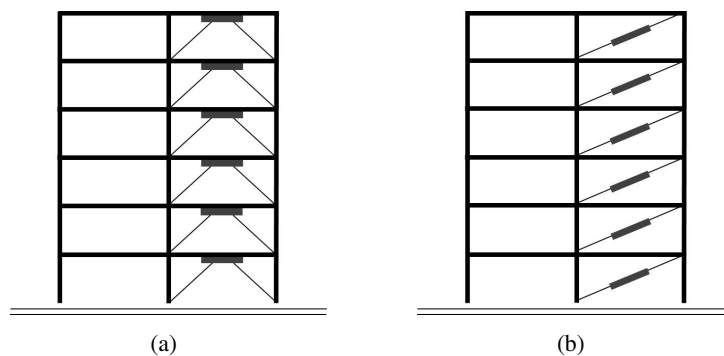


Figura 3.10: Diferentes disposições de elementos de contraventamento com dissipadores SMA em edifício de seis pisos. Adaptado de [30, 37].

Um exemplo deste tipo de dissipadores foi proposto e analisado por Dolce et al. [11], sendo implementados dois grupos distintos de fios de SMA, com funções também elas distintas. Fios de NiTi austeníticos pré-esforçados foram utilizados no grupo com função de reposicionamento do dispositivo, enquanto para o grupo dissipador de energia foram estudados alternadamente fios de NiTi martensíticos ou fios de NiTi austeníticos pré-esforçados. Este dispositivo é apresentado na figura 3.11.

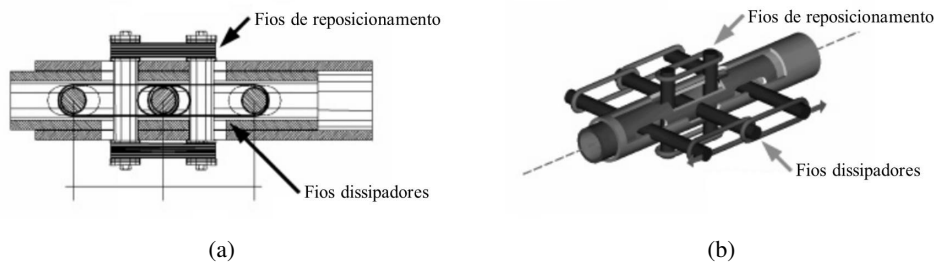


Figura 3.11: Dispositivo proposto por Dolce et al. Adaptado de [11].

As ligas com memória de forma podem também ser utilizadas como elementos amortecedores em pontes, por exemplo implementadas em pontes de tirantes tirando partido do efeito superelástico. Outra aplicação

### 3.2. APLICAÇÕES DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

em pontes prende-se com o descalçamento do tabuleiro, quando este é simplesmente apoiado, resultante de um diminuto comprimento de entrega nos apoios. A solução deste problema passa por um reforço, nas zonas juntas do tabuleiro ou junto aos encontros, com cabos de SMA que fazem a ligação entre elementos, na tentativa de diminuir os deslocamentos relativos [30, 37]. Na figura 3.12(a) representa-se um amortecedor composto por SMA numa ponte de tirantes, enquanto nas figuras 3.12(b) e 3.12(c) se representam elementos de prevenção do descalçamento de tabuleiros simplesmente apoiados, ao nível do encontro e entre elementos do tabuleiro, respectivamente. Na figura 3.12(c) é ainda possível observar, nas duas primeiras situações, o fenómeno de descalçamento, com o afastamento relativo entre os tabuleiros num comprimento que excede o espaço de entrega nos apoios.

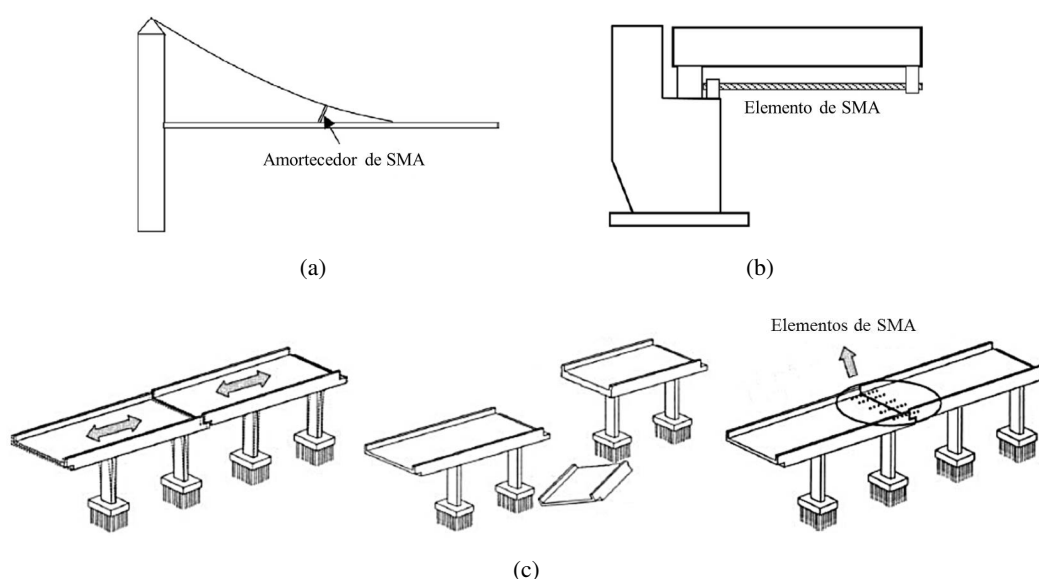


Figura 3.12: Elementos de SMA dissipadores de energia aplicados em pontes. Adaptado de [3, 9, 37].

Durante acções sísmicas é recorrente a acumulação de esforços nas zonas de ligação entre os elementos estruturais, as designadas zonas críticas, o que possibilita a formação de rótulas plásticas nestas zonas. Por forma a diminuir esta ocorrência e uma conseqüente possível instabilidade estrutural, propõe-se o uso de conectores de SMA, aumentando-se o amortecimento e a dissipação de energia nestes pontos, não à custa da formação de rótulas plásticas, mas sim do efeito superelástico das ligas com memória de forma. Dois exemplos são de seguida apresentados, o primeiro é um sistema de ancoragem de um pilar em betão com varões de Nitinol e aço proposto por Tamai e Kitagawa [38], o segundo é um conector sob a forma de um varão de SMA numa ligação entre um pilar de uma viga metálicos, proposto por Leon et al. [24]. Na figura 3.13 representam-se estes dois exemplos mencionados.

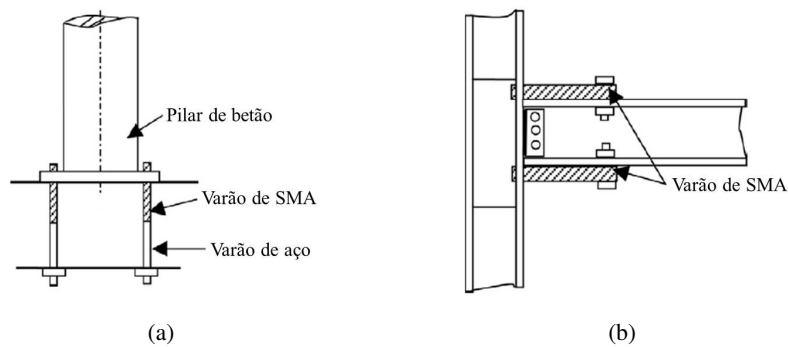


Figura 3.13: Exemplo de conectores em zonas críticas com o auxílio de varões de SMA. Adaptado de [37].

Também a reabilitação de edificado pode tirar partido das propriedades das ligas com memória de forma. A primeira vez que tal se efectuou foi na Igreja de S. Giorgio, na Itália, erguida em 1302 e atingida por um sismo, de magnitude 4.8 na escala de Richter, a 15 de Outubro de 1996, resultando em sérios danos na sua estrutura, como fracturas transversais no pilares e na alvenaria. A intervenção de reabilitação passou pela instalação de quatro tirantes de aço que foram pré-esforçados por quatro dispositivos de SMA pós-esforçados, ancorados no topo da estrutura e no solo, como meio de conectar o topo da torre ao solo. Esta intervenção resulta no aumento da resistência de flexão da torre e das frequências modais da mesma. Prova de que a intervenção descrita resultou como esperado foi o facto da torre ter resistido, sem qualquer dano, a uma nova solicitação sísmica de magnitude 4.5 na escala de Richter em 2000 [21, 30, 32, 37]. A torre S. Giorgio e um esquema da intervenção são apresentados na figura 3.14.

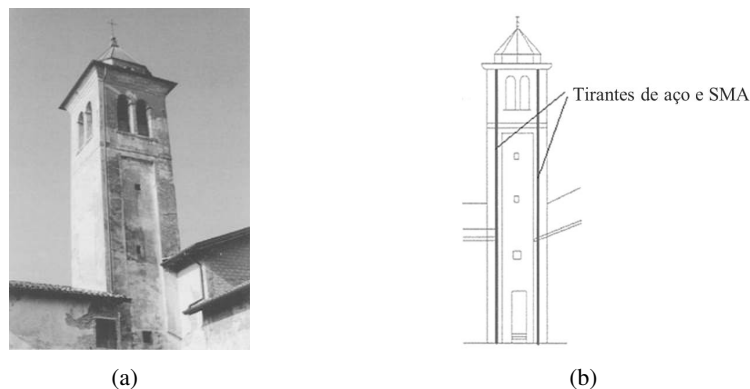


Figura 3.14: Torre de S. Giorgio, Itália, e esquema da intervenção. Adaptado de [21].

A outra abordagem existente dentro do controlo passivo de vibrações prende-se com técnicas de isolamento, geralmente na atenuação dos efeitos de solicitações sísmicas sobre a estrutura. O objectivo do isolamento sísmico é prevenir a transmissão das componentes horizontais das acelerações do solo, provenientes destes eventos sísmicos, às estruturas em que é implementado. A filosofia deste sistema de controlo de vibrações é a de minimizar a resposta da superestrutura à acção sísmica, ao invés de procurar resistir estruturalmente à acção [16]. A influência da introdução de um sistema de isolamento de base sobre a resposta em termos de deslocamentos numa estrutura é apresentada esquematicamente na figura seguinte.

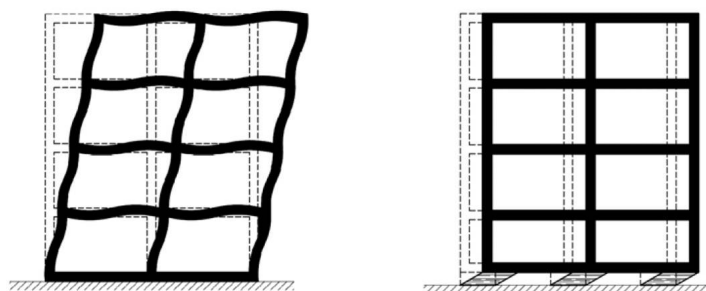


Figura 3.15: Deformações impostas por uma solicitação sísmica numa estrutura de base fixa (esquerda) e base isolada (direita). Adaptado de [16]

No que toca à utilização de SMA nesta técnica, as suas características de dissipador de energia e de elemento de re-centragem levam a que seja uma opção válida na incorporação destes dispositivos [30]. No projecto MANSIDE (dos inglês *Memory Alloys for New Seismic Isolation and Energy Dissipation Devices*) foi desenvolvido e testado, à escala real, por Dolce et al. [12] um sistema de isolamento composto por fios de Nitinol por forma a determinar a sua eficácia neste tipo de técnica de controlo de vibração. O sistema utiliza fios de SMA superelásticos e permite forças máximas de 600 kN e deslocamentos de 180 mm, sendo apresentado esquematicamente na figura 3.16. Este estudo confirmou a aplicabilidade de um sistema de isolamento constituído por fios de SMA no controlo passivo de vibração.

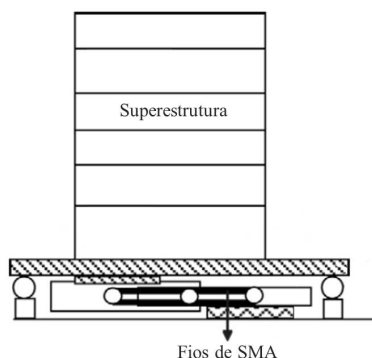


Figura 3.16: Esquema do sistema de isolamento de base implementando fios de SMA proposto por Dolce et al. Adaptado de [37]

Este sistema pode também ser utilizado em pontes, instalando neste caso os dispositivos entre o tabuleiro e entre o topo dos pilares e os encontros.

Usualmente são utilizados blocos de borracha com núcleo de chumbo (LRB, do inglês *Lead Rubber Bearings*) nesta técnica de isolamento. A estrutura interna destes blocos é apresentada esquematicamente na figura 3.17(a), onde se pode observar a borracha laminada que serve o propósito de suportar as cargas verticais e isolar horizontalmente as vibrações e também o núcleo de chumbo com capacidade de dissipação da energia de vibração associada ao amortecimento histerético, representado na figura 3.17(b).

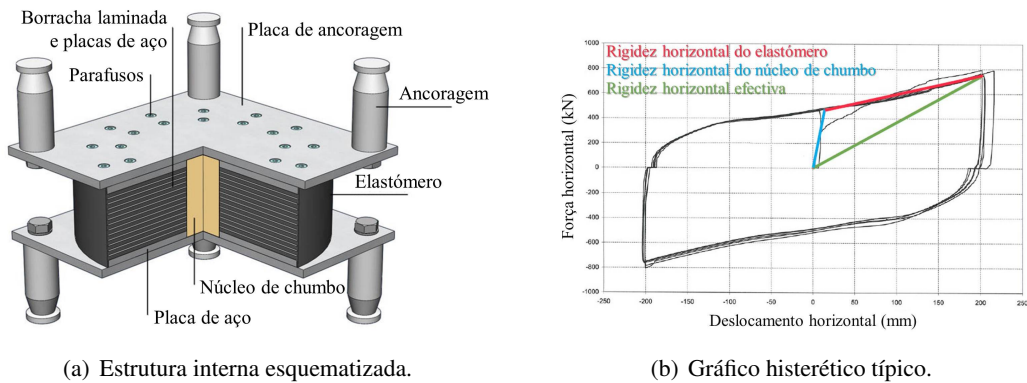


Figura 3.17: Bloco de borracha com núcleo de chumbo (LRB). Adaptado de [1].

Estes dispositivos, apesar de serem comumente utilizados, podem não ser os mais eficazes em toda a amplitude de solicitações, evidenciando mesmo incapacidade em limitar deslocamentos demasiado elevados. Por forma a tornar estes dispositivos mais eficazes, deverá ser utilizado um material no núcleo capaz de modificar as suas propriedades consoante a magnitude da solicitação. Assim, a utilização de SMA torna-se uma opção mais viável, procurando-se que este se comporte rigidamente (para pequenas solicitações) não danificando por exemplo as juntas, como uma ligação flexível (para solicitações médias) de forma a dissipar energia e limitando os deslocamentos (para solicitações elevadas) por forma a que o colapso da estrutura seja evitado [30]. Por forma a estudar a eficácia das ligas com memória de forma em substituição do núcleo de chumbo Wilde et al. [43] testam as duas soluções e comparam-nas para três solicitações distintas, concluindo-se a eficácia e adaptabilidade da solução com SMA para diferentes níveis de solicitação. O modelo da ponte testada por Wilde et al. e o seu comportamento quando solicitada por uma acção sísmica são apresentados na figura 3.18. Quanto aos resultados deste estudo, estes indicam que de um modo geral a utilização de SMA leva a menores deslocamentos para solicitações baixas e intermédias e aos mesmos valores máximos no caso de solicitações elevadas, devido a ambos os sistemas possuírem dispositivos limitadores, apesar do sistema com SMA apenas registar o valor máximo uma vez e no sistema convencional este valor ser atingido cinco vezes. No entanto devido à maior rigidez do sistema, quando é utilizado SMA geram-se maiores forças e acelerações. Apesar disto o sistema com SMA permite uma maior dissipação de energia [30].

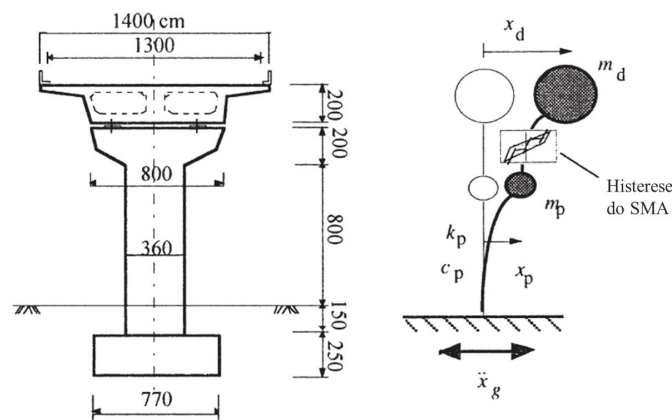


Figura 3.18: Modelo da ponte testada por Wilde et al. [43].

#### Outras áreas

Para além de todas as aplicações mencionadas nestas áreas, existem ainda vastas possibilidades de utilização das ligas com memória de forma. A propriedade superelástica destas ligas é posta em prática em armações de óculos (figura 3.19(a)), *headphones* e antenas de telemóveis, permitindo que sejam dobradas e deformadas sem que partam, retornando à sua configuração inicial. São ainda utilizadas em tacos de golfe devido à sua propriedade de elevado amortecimento (figura 3.19(b)) [17, 22, 23].



Figura 3.19: Aplicação de ligas com memória de forma em (a) armações de óculos [23] e (b) tacos de golfe [2].

A utilização das ligas com memória de forma está actualmente a disseminar-se amplamente, chegando cada vez mais perto do utilizador comum sob a forma de objectos e utensílios do dia-a-dia, existem diversos exemplos desta aproximação.

Foram desenvolvidas dobradiças, para o uso em estufas, que permitem a abertura de janelas quando a temperatura excede um valor predeterminado. Com o mesmo princípio foram desenvolvidas válvulas de Nitinol para equiparem máquinas de fazer café e de arroz, no primeiro caso a válvula apenas permite o acesso da água ao café quando esta ascende a uma determinada temperatura, no outro a válvula liberta o excesso de vapor quando uma determinada temperatura for alcançada [22, 23].

Podem ser ainda encontradas aplicações em dispositivos recreativos, em inúmeros brinquedos. Um exemplo são as colheres utilizadas por mágicos como adereço em números de ilusionismo, as quais "magicamente" se dobram enquanto friccionadas entre dois dedos. Este truque tira partido do efeito de memória de forma, usando a fricção dos dedos sobre a colher para aquecer a liga a uma temperatura superior a  $A_f$ .



## Capítulo 4

# Estratégia de *design* e controlo

### 4.1 Introdução

No presente capítulo serão fundamentadas as escolhas ao nível do *design* do actuador a desenvolver. Logicamente, este processo passará em primeiro lugar por definir claramente qual a função do actuador e quais as necessidades funcionais deste. Também será apresentada uma configuração experimental utilizado no estudo do controlo do actuador, definindo os vários componentes e as suas funções, assim como a calibração e teste deste configuração.

### 4.2 *Design* do actuador

#### 4.2.1 Conceitos gerais

O actuador em estudo tem como finalidade o controlo de deformações em fachadas de vidro induzidas pela acção do vento. Assim, pretende-se que este sistema seja capaz de garantir a atenuação das deformações ao nível do vidro, através da produção de forças de actuação. É ainda importante que, para além da ser operacional, seja um sistema simples e fiável, de pequenas dimensões de forma a garantir a transparência do sistema global da fachada, tratado na secção 4.2.6.

#### 4.2.2 Método de activação

Uma vez que a activação do efeito de memória de forma é térmica, deverá ser escolhido o método mais vantajoso entre uma activação eléctrica ou puramente térmica.

O primeiro método tira partido do efeito de Joule em materiais condutores eléctricos, nos quais a passagem de corrente eléctrica induz à libertação de calor. Este efeito traduz a primeira lei de Joule, onde é estabelecida uma proporcionalidade entre o calor gerado e entre a corrente e resistência eléctricas num circuito eléctrico [39], expresso por:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (4.1)$$

onde  $Q$  é o calor gerado,  $I$  a corrente eléctrica no elemento em Ampere,  $R$  a resistência eléctrica do elemento em Ohm e  $t$  o tempo decorrido.

Importa ainda definir a resistência eléctrica que é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4.2)$$

em que  $\rho$  é a resistividade eléctrica do material em Ohm-metro,  $l$  o comprimento do elemento em metros e  $A$  a área da secção transversal do elemento em metros quadrados.

Como é possível deduzir das equações 4.2 e 4.1, de modo a conseguir um aquecimento suficiente, este método é o ideal para elementos com elevada resistividade eléctrica, como metais, e reduzida secção transversal. Por isto é o método apropriado para ligas com memória de forma sob a forma de fios, para além de ser de simples implementação. Para elementos mais robustos e com maior diâmetro, como barras, pode-se utilizar o mesmo princípio, envolvendo os elementos de SMA com fios de elevada resistência eléctrica e fazendo passar por estes uma corrente eléctrica que aquecerá o elemento de SMA [2, 20].

O segundo método passa pela activação puramente térmica dos elementos de SMA, ou seja, controlando a temperatura exterior do elemento ou através da exposição deste a radiação térmica. A primeira possibilidade torna-se demasiado complexa uma vez que a amplitude de temperaturas é demasiado elevada, tornando o processo de aquecimento e arrefecimento em temperaturas precisas muito difícil. A segunda possibilidade, de exposição a radiação térmica está praticamente restrita a utilizações no espaço [2, 20].

Assim, optou-se pela activação dos elementos de liga com memória de forma de forma eléctrica, pela passagem de corrente directamente através destes.

### 4.2.3 Tipo de actuador

Os actuadores podem ser categorizados, segundo o tipo movimento final alcançado pelo actuador, em actuadores lineares ou rotacionais. Os actuadores lineares apresentam uma maior eficiência de amplitude de movimento quando comparados com os rotacionais, sendo ao mesmo tempo mais simples. Mas nem sempre se pretendo um movimento linear, como é o caso das mãos robóticas em que se reproduzem os movimentos reais de mãos humanas, sendo necessária a introdução de articulações ou rótulas rotacionais [2].

No presente trabalho, tendo em vista a finalidade do actuador, foi estudado o tipo de actuador linear, uma vez que é o que melhor serve o propósito final, tirando-se também partido da sua simplicidade de implementação.

#### 4.2.4 Limitações

Apesar das ligas com memória de forma terem no seu vasto leque de formas de implementação, modos de aplicação e inúmeras aplicações possíveis a sua grande vantagem, existem limitações ao nível dos custos e da disponibilidade comercial destas.

Estas limitações levaram à escolha de SMA sob a forma de fios com diâmetro de 0,51 mm compostos por NiTi com o nome comercial de Flexinol<sup>®</sup>, por ser o material disponível, no departamento onde este trabalho foi levado a cabo, que preenche os requisitos descritos.

Assim resumem-se na tabela 4.1 as principais características destes fios, especificadas pelo seu fabricante.

Tabela 4.1: Características técnicas do tipo de fio escolhido especificadas pelo fabricante. Adaptado de [40].

Diâmetro (mm)	Resistência por metro (Ohm/m)	Força de puxe (kg)	$I$ (mA)	Tempo de arrefecimento (s)
0.51	4.3	3.56	4000	16.8

#### 4.2.5 Temperatura operacional

Como já foi referido anteriormente o efeito de memória de forma é um fenómeno termomecânico, induzindo uma resposta mecânica através de alterações térmicas. É por isso importante definir, para o material em estudo, as temperaturas que caracterizam as suas mudanças de fase.

Já foi referido que durante a transformação directa, no arrefecimento do material, este passa de uma fase austenítica para uma fase martensítica maclada, marcando  $M_s$  a temperatura de início e  $M_f$  a temperatura final da transformação. A transformação inversa, no aquecimento do material, tem início na temperatura  $A_s$ , estando completa na temperatura  $A_f$ .

É este intervalo de temperaturas que interessa determinar, uma vez que este traduz o intervalo em que existe resposta mecânica do material, ou seja, em que a aplicação sob a forma de actuador se torna possível.

Para tal é utilizado um teste de calorimetria diferencial de varredura (do inglês *Differential Scanning Calorimeter*, DSC). Este teste mede a relação entre a potência de entrada e saída e entre a variação na temperatura de uma pequena amostra do material. Num gráfico que relaciona o fluxo de calor com a temperatura, como é exemplo a figura 4.1, os picos e depressões apresentadas marcam transformações exotérmicas e endotérmicas, assim como as temperaturas de início e fim destas transformações [20].

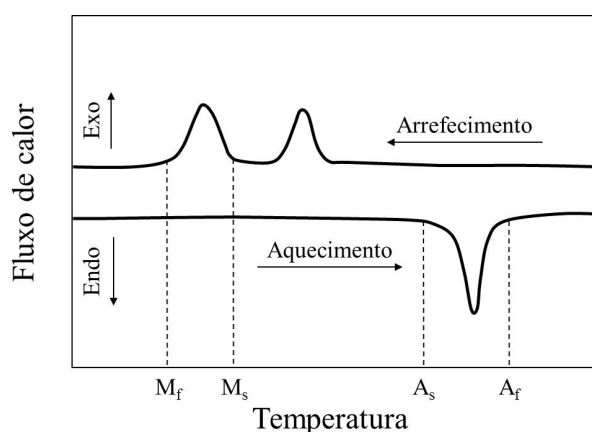


Figura 4.1: Gráfico esquemático de um teste DSC.

Este teste foi realizado no material a ser utilizado neste trabalho, apresentado na secção 4.2.3, obtendo-se o gráfico ilustrado na figura 4.2.

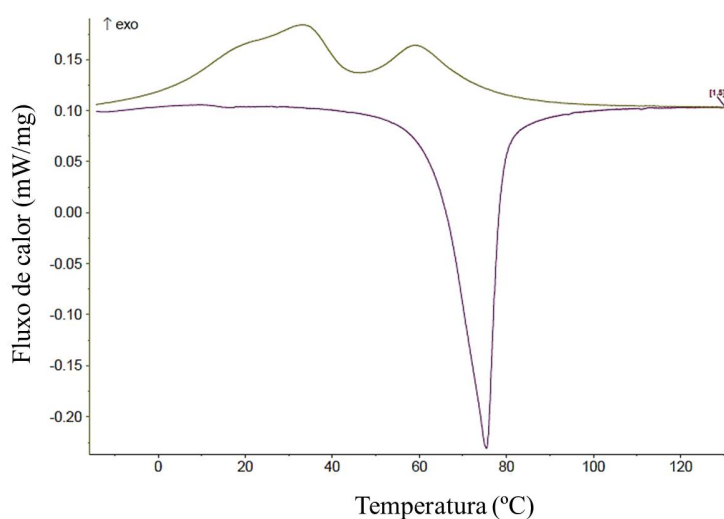


Figura 4.2: Caracterização termomecânica do fio de NiTi no teste DSC.

Observando a figura 4.2 é possível determinar os valores aproximados das temperaturas de início e fim de cada uma das transformações. Assim, aproximadamente, os valores para a transformação directa são  $M_f = 10\text{ }^\circ\text{C}$  e  $M_s = 45\text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto na transformação inversa se tem  $A_s = 45\text{ }^\circ\text{C}$  e  $A_f = 95\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.6 Geometria do modelo real

Tendo em consideração o que já foi referido nas secções anteriores sobre o *design* do controlador, serão em seguida apresentadas algumas opções de implementação do controlador num modelo real, com o intuito de se perceber qual a mais viável.

## 4.2. DESIGN DO ACTUADOR

O controlador está pensado para actuar em fachadas de vidro com uma geometria de alçado de 3 m de altura por 3 m de largura e com os apoios preferencialmente nos cantos. A finalidade do actuador é a de minimizar as deformações (flecha a meio vão) na fachada de vidro, quando esta é sujeita à acção do vento perpendicularmente ao seu plano, para valores aceitáveis, através de uma contra-flecha. A forma mais simples de transferir a força/deslocamento linear, produzido pelos fios de SMA, para o plano transversal da fachada de vidro é através da utilização de desviadores. Assim, é necessário definir uma configuração do controlador o mais eficaz e simples, ou seja, mais viável.

Será imprescindível relacionar a vertente funcional deste dispositivo com o aspecto mais estético do mesmo, não desvirtuando as características de transparência e luminosidade destas fachadas.

As cinco opções consideradas são em seguida apresentadas da figura 4.3 à 4.7, modeladas no *software* SAP2000<sup>®</sup>. Esta modelação será importante, não só para compreender visualmente as opções, mas também para fazer uma análise comparativa entre a eficácia teórica de cada opção, no que diz respeito à contra-flecha produzida.

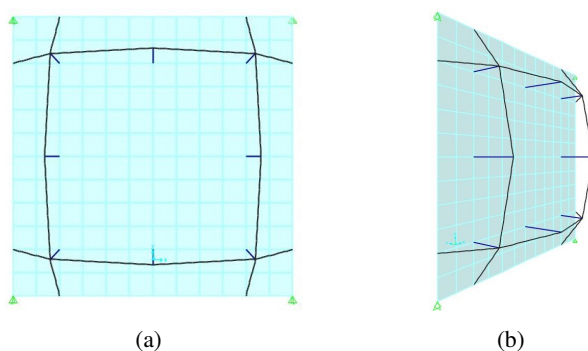


Figura 4.3: Opção de implementação do controlador 1. Desviadores centrais com 60 cm e restantes com 40 cm.

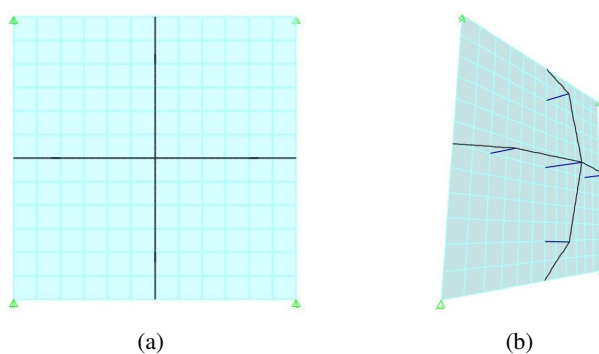


Figura 4.4: Opção de implementação do controlador 2. Desviador central com 60 cm e restantes com 40 cm.

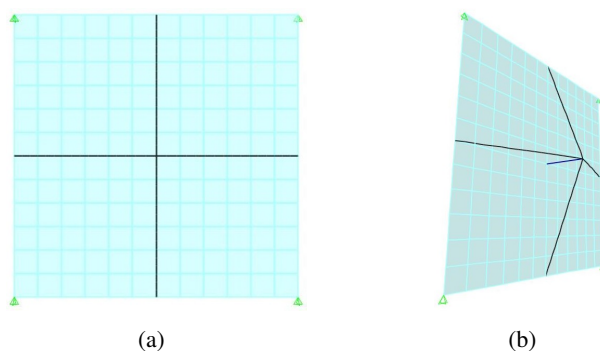


Figura 4.5: Opção de implementação do controlador 3. Desviador com 60 cm.

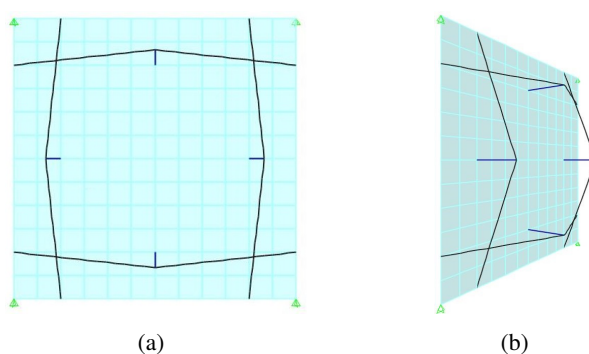


Figura 4.6: Opção de implementação do controlador 4. Desviadores com 60 cm.

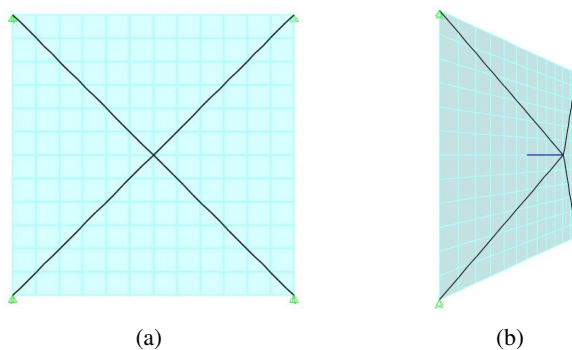


Figura 4.7: Opção de implementação do controlador 5. Desviador com 60 cm.

Na tabela 4.2 apresentam-se os valores da contra-flecha teórica, verificada a meio vão do elemento de fachada, quando os cabos aplicam uma força sobre a restante estrutura, à semelhança do que acontece durante a activação dos fios de SMA. Esta força será modelada como uma força objectivo (do inglês *target force*) de 1 kN nos cabos, tratados como elementos cabo (*cable*).

Na última linha da tabela é possível observar ainda as percentagens de cada opção, relativamente à opção com maior valor de contra-flecha teórico. Importa referir que estes valores quantitativos são meramente

### 4.3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

comparativos entre as opções, visando uma análise à eficiência relativa de cada uma das configurações geométricas apresentadas.

Tabela 4.2: Comparação entre as várias opções dos valores teóricos da contra-flecha.

	Opção				
	1	2	3	4	5
Deslocamento (cm)	9.28	4.33	3.70	7.56	5.88
	-	46.7%	39.9%	81.5%	63.4%

Verifica-se que, apenas considerando o valor teórico da contra-flecha, as opções 1 e 4 são as mais eficientes. No entanto existem outros factores que devem ser tidos em consideração. Relativamente à complexidade da configuração, ao nível da quantidade de material (desviadores e cabos) e do número pontos de fixação no elemento de fachada, são precisamente as opções 1 e 4 as menos vantajosas. Neste ponto, da simplicidade, as opções 3 e 5 apresentam-se como mais favoráveis. Deve ser salientado que este ponto influencia também de maneira muito significativa os custos da solução final, ao nível do custo de implementação e da fiabilidade da solução final.

Analisando as condicionantes acima mencionadas, escolheu-se a opção 5 como aquela que melhor se adaptará à necessidade da solução final. Para além de ser uma das opções mais simples e de o seu valor teórico da contra-flecha ser razoável, constata-se uma outra vantagem, os pontos de fixação da extremidade dos cabos situarem-se no mesmo ponto da fixação do elemento de fachada a uma estrutura de suporte. Assim, existe apenas a necessidade de um ponto de fixação do sistema de controlo no elemento de fachada, para além dos cantos que seriam sempre necessários à partida.

### 4.3 Configuração experimental

Por forma a calibrar o controlo e testar os fios de SMA a utilizar no actuador final, procedeu-se à montagem de uma configuração experimental. Esta configuração foi pensada para poder ser utilizada em dois tipos de teste, consoante seja a força ou o deslocamento a variável controlada.

Desta configuração faz parte uma estrutura de alçado retangular em parte metálica e em parte de madeira, que serve o propósito de manter o fio de SMA em posição aquando da sua activação, assim como os restantes componentes ligados ao fio.

Na configuração apresentada na figura 4.8 poderá ser realizado o controlo do deslocamento da extremidade do fio, pelo que existe a necessidade da introdução de uma mola (1) nesta extremidade, que faz a ligação com a estrutura e introduz uma força constante, por forma a garantir a recuperação da configuração inicial do fio durante o seu arrefecimento. Nesta configuração a geometria da estrutura impõe um comprimento do fio de SMA a utilizar de 54 cm.

Na configuração usada no controlo da força produzida pelo fio de SMA, a única diferença será a não existência da mola, uma vez que não existe deslocamento das extremidades do fio e conseqüentemente não há a necessidade de recuperar uma configuração inicial. Assim, a extremidade do fio encontra-se fixa à estrutura de suporte.

É ainda possível identificar na figura 4.8 uma célula de carga (2) para determinar as forças geradas pela activação do fio, um sensor *laser* (3) para medição de deslocamentos, um sensor termopar (4) para medição da temperatura e dois fios eléctricos (5 e 6) para a introdução de corrente no fio de SMA. Para além do mais é ainda colocada uma régua de 50 cm por forma a dar uma percepção da escala da estrutura.

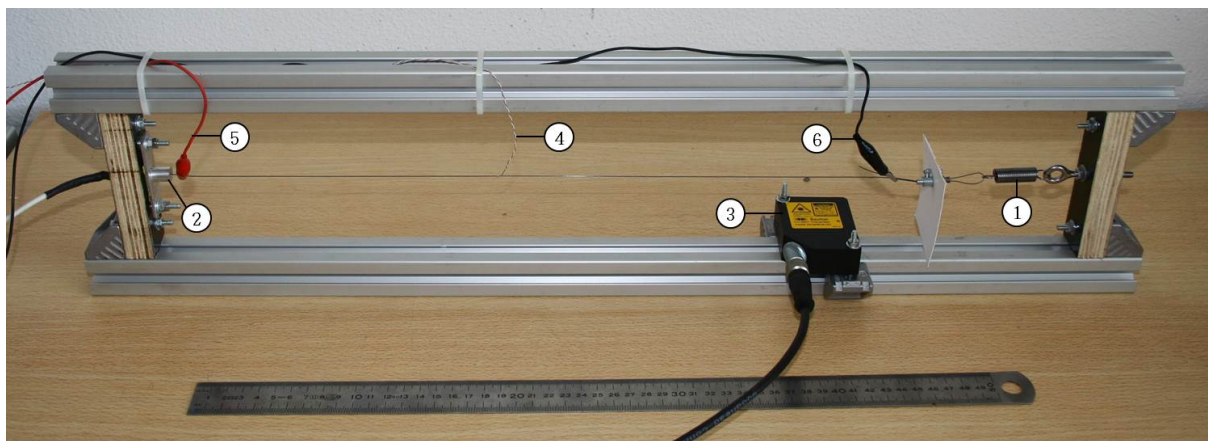


Figura 4.8: Estrutura de suporte do fio de SMA e aparelhos auxiliares.

A corrente eléctrica introduzida no fio de SMA é fornecida por uma fonte de alimentação programável, com uma amplitude de corrente eléctrica de 0-25 A e voltagem de 0-40 V, apresentada na figura 4.9.



Figura 4.9: Fonte programável de alimentação de corrente eléctrica ao fio de SMA.

Os dados de saída (do inglês *outputs*) provenientes da célula de carga, do termopar e do sensor *laser* chegam através de portas de dados de entrada (do inglês *input*) analógicas a um módulo de aquisição de dados (DAQ, do inglês *Data Acquisition*) da empresa National Instruments™. Por outro lado, o sinal de controlo da fonte de alimentação é fornecido através das portas de saída analógicas do DAQ.

O controlo do actuador de SMA é efectuado através de algoritmos de controlo implementados em LabVIEW™, com auxílio a uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments™. A voltagem de *output* de controlo parte de um computador e é enviada através do sistema de DAQ para a fonte de alimentação programável. A corrente que é então introduzida no fio de SMA resulta num processo de aquecimento deste e consequentemente à transformação de fase quando a temperatura atinge a de transformação. Em seguida, dependendo da configuração utilizada, ou se dá a contração do fio de SMA medida pelo sensor *laser* ou o fio de SMA produz uma força restringida que

### 4.3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

é medida pela célula de carga. Estes dados de medição, num processo de controlo, são enviados de volta ao algoritmo inicial como *feedback*.

A configuração experimental, durante o controlo do deslocamento da extremidade do fio de SMA, pode ser traduzido esquematicamente conforme se apresenta na figura 4.10, de forma a uma mais fácil compreensão.

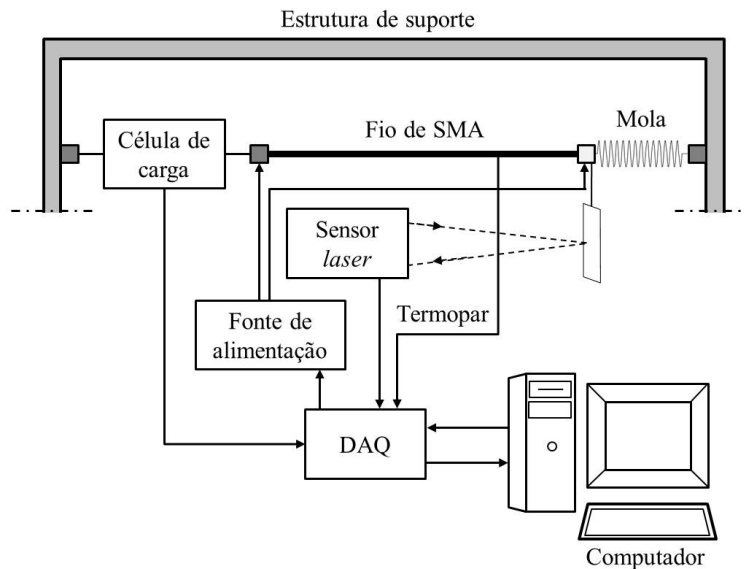


Figura 4.10: Esquema da configuração experimental para o controlo de deslocamentos. Adaptado de [34].

Em seguida apresentam-se duas fotografias em pormenor de uma das extremidades do fio e da sua ligação à estrutura por intermédio da mola. Estas fotografias pretendem demonstrar como foi feita esta ligação e proporcionar uma melhor percepção da amplitude que a actuação deste fio consegue alcançar. Na primeira apresenta-se a situação em que o fio não actua a mola, exibindo esta uma posição indeformada. Na segunda exibe-se a mola aquando da actuação por parte do fio na sua posição deformada, traduzindo um alongamento na ordem dos 15 mm.

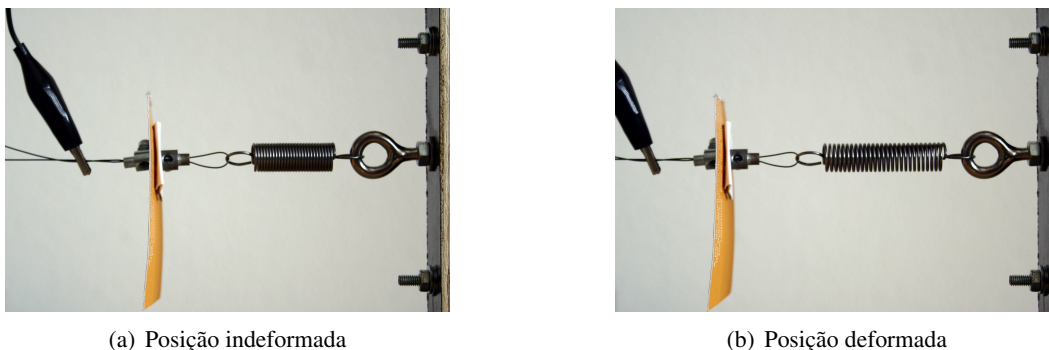


Figura 4.11: Posições indeformada e deformada da mola durante a actuação do fio de SMA.

Desde logo é identificado um problema nesta configuração que é visível na comparação destas duas fotografias. Este problema prende-se com a necessidade de fixação de um elemento capaz de servir de alvo para o sensor *laser*. Este alvo deverá ser leve o suficiente para não interferir com o deslocamento devido à actuação do fio de SMA, mas deverá conseguir manter uma forma que não se altere durante este processo. Como é possível observar na figura 4.11 a posição do alvo roda em torno do fio, da posição indeformada para a deformada. Mesmo depois de diferentes materiais terem sido utilizados para este fim, este problema foi recorrente.

Assim, por se considerar que o estudo das duas variáveis (força ou deslocamento) é dependente, optou-se por uma questão de simplicidade e de minoração dos erros provenientes do problema mencionado do paragrafo anterior, apenas no estudo da variável força neste controlador. Julga-se que no que aos objectivos deste trabalho diz respeito, que se prendem com a sensibilidade à variação dos parâmetros de controlo deste controlador, não se perde significativamente com esta opção. Por outro lado ganha-se um controlador mais simples e menos propenso à existência de erros sistémicos.

Também a configuração experimental para o controlo da força pode ser esquematicamente representado conforme a figura 4.12.

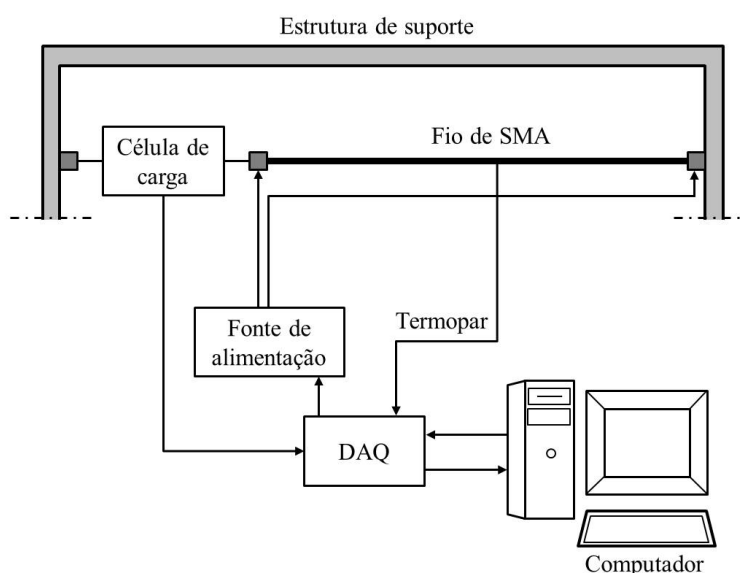


Figura 4.12: Esquema da configuração experimental para o controlo da força. Adaptado de [34].

## 4.4 Teoria de controlo

Nesta secção será abordado o processo de controlo da variável deste sistema<sup>1</sup>, nomeadamente a força gerada pelo fio de SMA. Interessa por isso apresentar o tipo de sistema de controlo e as acções de controlo sobre o sistema, assim como o processo de calibração do controlo.

<sup>1</sup>Na teoria de controlo designa-se por sistema a combinação de componentes que actuam em conjunto para efectuar um certo objectivo. No presente caso tem-se como sistema o conjunto de dispositivos apresentados na secção 4.3, com o objectivo de controlar a força no fio de SMA

Existem dois tipos de sistemas de controlo quanto ao tipo de malha, o controlo em malha aberta (*open-loop control*) e o controlo em malha fechada (*closed-loop control*).

No controlo em malha aberta a resposta do sistema não é nem lida nem comparada com sinal de referência, uma vez que as condições de funcionamento são constantes e sem qualquer dependência da resposta do sistema. Este tipo de sistema, na prática, não pode ser utilizado se existirem perturbações, internas ou externas, e se não se conhecer a relação entre a entrada e saída do sinal. Por isto, a precisão do controlo depende em grande medida da calibração das acções de controlo. São ainda sistemas em que a instabilidade não representa um problema significativo, mas que necessitam, para além de peças fiáveis, de frequente manutenção e recalibração do sistema [28].

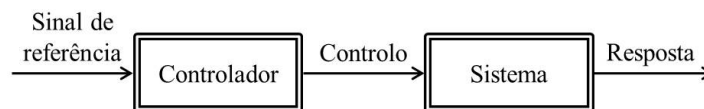


Figura 4.13: Sistema em malha aberta.

Em sistemas de controlo com malha fechada utiliza-se a minimização do erro (diferença entre a resposta e o sinal de entrada) como meio de controlo, através da variação da acção de controlo, num processo denominado de *feedback*. Basicamente os controladores percebem, através de medições, o funcionamento de um sistema e comparam-no com o comportamento desejado, computando em seguida acções correctivas que actuam sobre o sistema por forma a obter o efeito desejado. São por isso menos sensíveis, que os sistemas em malha aberta, a perturbações externas ou a variações internas do sistema, estando por isso mais aptos à utilização de componentes mais baratos e menos precisos sem grande alteração da qualidade da resposta. Nestes sistemas a instabilidade é um problema a considerar [4, 28].

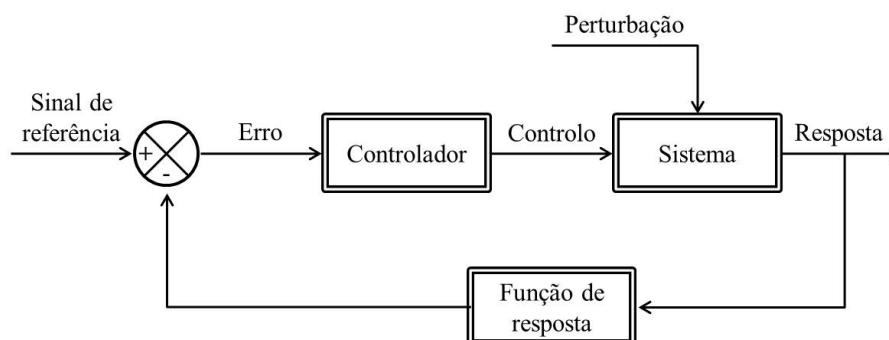


Figura 4.14: Sistema em malha fechada.

Note-se que em geral os sistemas de controlo em malha aberta são mais simples, constituídos por menos componentes e resultam em menos custos operacionais que os sistemas em malha fechada. Por isto, quando o sinal de referência é determinado de antemão e não existem perturbações aplicadas ao sistema, é preferível optar-se por um sistema de controlo em malha aberta [28].

Apesar disto, na maioria dos casos onde a implementação de controladores é interessante ou necessária, os sistemas são perturbados por factores externos ou existe a necessidade de acompanhar uma variação do

signal de referência. Nestes casos deve recorrer-se ao controlo em malha fechada, sendo os seus conceitos centrais a medição (*sensing*), a computação e a actuação [4].

As questões chave na problemática do controlo prendem-se com: a necessidade de estabilidade da resposta, garantindo que perturbações delimitadas na sua amplitude resultam em erros também delimitados; a responsividade, ou seja, a rapidez de resposta a perturbações e alterações no sinal de referência, sem tornar o sistema descontrolado; uma eficaz atenuação das perturbações [4].

Outro aspecto a ter em consideração é a introdução de incertezas nos sistemas de controlo, cuja ocorrência é uma constante e que por isso devem ser compreendidas as suas causas. Este problema pode ter como origem o ruído captado durante a medição e actuação do controlador, perturbações externas que afectam a operação do sistema (como por exemplo a convecção do ar à volta do fio de SMA) e variáveis dinâmicas do sistema (por exemplo o comportamento não linear histerético, e termomecânico do SMA) [4].

Um exemplo simples do controlo em malha fechada ou em *feedback* é o termostato. Este dispositivo mede a temperatura num dado momento e compara-a com a temperatura desejada predefinida, utilizando o erro entre as duas para controlar o sistema de aquecimento. Quando a temperatura medida se situa acima do desejado o aquecimento é desligado, enquanto no caso de ser inferior o aquecimento é ligado. Uma vez que existem atrasos inerentes, tanto no processo de aquecimento como na medição, o controlo pode ser melhorado se for introduzida uma componente de antecipação nas acções de controlo (ligar e desligar o aquecimento), por exemplo desligando o aquecimento antes do valor do erro mudar de sinal. Evitam-se assim variações excessivas na temperatura e consequentemente torna-se o sistema mais eficiente [4].

#### 4.4.1 Acções de controlo

A implementação do controlo através de acções correctivas, que são baseadas no erro medido, pode ser efectuada de diversas formas, no que diz respeito ao tipo de acção. O tipo de acção de controlo mais simples pode ser encontrado em controlos *on-off* ou ainda do tipo proporcional e subsequentemente integral e derivativo.

O mecanismo de controlo *on-off* pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$u(t) = \begin{cases} u_{max}, & \text{se } e(t) > 0 \\ u_{min}, & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

que relaciona, num dado instante  $t$ , a resposta do controlador  $u(t)$  com o erro  $e(t)$ . Nesta relação está implícita a utilização de acções de controlo extremas, quer seja a máxima ou a mínima, sem patamares intermédios.

A simplicidade e a inexistência de parâmetros ou variáveis para ajustar são as grandes vantagens deste controlo. Neste tipo de controlo insere-se o termostato referido anteriormente, no final da secção 4.4, no seu caso mais simples, sem a parcela de antecipação [4]. Na prática, o controlo *on-off* traduz, muitas vezes na sua forma mais simples mas também mais fiel, as restrições reais dos dispositivos utilizados em

sistemas de controlo, uma vez que por exemplo no caso do termostato, o aquecimento tem por norma apenas dois patamares, ou se encontra ligado ou desligado.

Este tipo de controlo normalmente origina respostas do sistema que oscilam em volta do sinal de referência, o que normalmente é aceitável se a amplitude desta oscilação for pequena. Basicamente, esta oscilação deve-se ao facto do sistema actuar em demasia para pequenas variações do erro, quando este se aproxima de zero e muda de sinal, variando a resposta em toda a sua amplitude de  $u_{max}$  para  $u_{min}$ , ou vice versa. Estas oscilações podem não ser aceitáveis nas situações em que se evidenciem amplitudes elevadas [4].

O problema descrito pode ser superado com a utilização de uma acção de controlo proporcional, o que resulta numa resposta que é proporcional ao erro medido, sem saltos abruptos entre os extremos da resposta do controlo.

#### Acção de controlo proporcional

A principal diferença da acção de controlo proporcional comparativamente ao controlo *on-off* é a introdução de um patamar intermédio, em que a resposta do controlador  $u(t)$  e o erro  $e(t)$  medido se relacionam na proporção directa de um parâmetro  $K_p$ , denominado de ganho proporcional, traduzido na expressão:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.4)$$

Podendo-se então definir a resposta em toda a sua amplitude como:

$$u(t) = \begin{cases} u_{max}, & \text{se } e(t) \geq e_{max} \\ K_p e(t), & \text{se } e_{min} < e(t) < e_{max} \\ u_{min}, & \text{se } e(t) \leq e_{min} \end{cases} \quad (4.5)$$

O controlo proporcional é basicamente um amplificador com um determinado ganho ajustável [28], enquanto o erro é mantido entre  $e_{min}$  e  $e_{max}$ , a denominada banda proporcional (PB, do inglês *proportional band*) [4].

Em termos teóricos pode-se resumir a influência da variação dos valores do ganho proporcional  $K_p$  sobre a resposta do controlo em dois pontos, traduzidos na figura 4.15. Para ganhos elevados o sistema tende a ser mais responsivo e próximo do sinal de referência em termos absolutos, mas também mais oscilatório, podendo mesmo tornar-se instável. Para valores baixos de  $K_p$  obtém-se um controlador menos responsivo e sensível a perturbações externas, podendo mesmo não ser suficiente para que a resposta se aproxime do valor desejado.

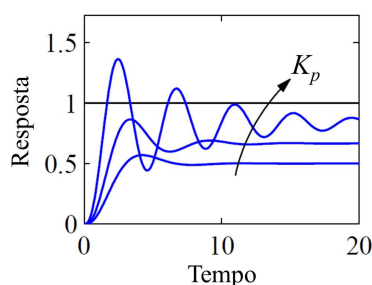


Figura 4.15: Variação da resposta com a alteração do valor de  $K_p$  para um controlador proporcional. Adaptado de [4].

Apesar das vantagens sobre o controlo *on-off* a acção de controlo proporcional necessita de um erro diferente de zero para operar, resultando geralmente na existência de um erro residual em estado estacionário. Este problema pode ser ultrapassado pela sua combinação com uma acção de controlo que seja proporcional ao integral do erro, ou seja, uma acção de controlo integral [4].

### Acção de controlo integral

Num controlador com uma acção de controlo integral, a resposta do controlador  $u(t)$  é alterada a uma taxa proporcional ao erro  $e(t)$ , pelo que:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4.6)$$

em que  $K_i$  é uma constante ajustável, equivalente a  $K_p/T_i$ , onde  $T_i$  representa o tempo integral.

A parcela integral da acção de controlo traduz o erro acumulado até ao instante  $t$  multiplicado por uma constante. Esta parcela tende a eliminar o erro residual em estado estacionário e aproximar a resposta ao sinal de referência. O seu aumento leva a uma maior atenuação de perturbações, podendo porém provocar um comportamento oscilatório e possivelmente instabilidade do sistema [4]. Estes aspectos são observados na figura 4.16.

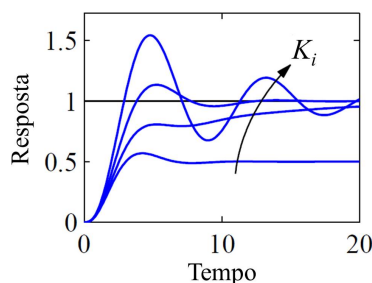


Figura 4.16: Variação da resposta com a alteração do valor de  $K_i$  para um controlador proporcional-integral. Adaptado de [4].

### Acção de controlo derivativa

Com o intuito de aprimorar o controlo introduz-se, quando necessário, uma parcela que pretende antecipar o erro da resposta. Isto é feito através da extrapolação linear do valor do erro futuro com base na derivada (declive da função de erro) do erro actual, através da seguinte aproximação:

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

Esta expressão prevê aproximadamente o erro em  $T_d$  unidades de tempo.

Assim, num controlador com uma acção de controlo derivativa, a resposta do controlador  $u(t)$  depende da taxa de variação do erro  $e(t)$ , expressa por:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.8)$$

em que  $K_d$  é uma constante ajustável, equivalente a  $K_p \cdot T_d$ .

A acção derivativa torna o sistema mais amortecido à medida que o valor do ganho derivativo  $K_d$  aumenta, levando em teoria a uma estabilização da resposta, reduzindo o tempo de estabilização. Pode ser observado o que aqui se refere na figura 4.17.

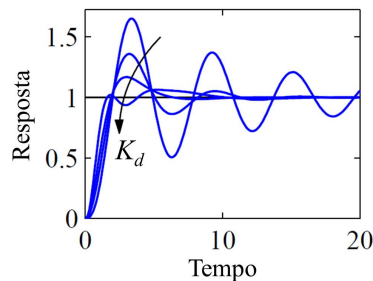


Figura 4.17: Variação da resposta com a alteração do valor de  $K_d$  para um controlador proporcional-integral-derivativo. Adaptado de [4].

Na prática, coloca-se um problema na utilização desta acção, uma vez que se o ruído introduzido no sistema for demasiado elevado, durante o processo de medição, esta parcela pode tornar a resposta demasiado sensível a este ruído. Como consequência a acção poderá adquirir um carácter errático e instável, degradando o desempenho do controlo. Pode ser atenuado este fenómeno pela passagem dos dados de medição por um filtro *low-pass*, por forma a diminuir as flutuações e picos devidos ao ruído.

Importa ainda referir que esta acção de controlo não é utilizada separadamente de outro tipo de acção, uma vez que tem por base a variação do erro, o que não estabelece relação com o valor absoluto do erro. Assim, geralmente combina-se pelo menos com a acção de controlo proporcional (acção controlo proporcional-derivativo).

### Acção de controlo proporcional-integral-derivativo

A acção de controlo proporcional-integral-derivativo (PID) passa pela combinação destes três tipos de acção, de forma a tirar partido das vantagens de cada uma delas e traduz-se na soma dos seus termos na seguinte expressão:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.9)$$

que relaciona a resposta do controlador  $u(t)$  com o erro  $e(t)$  em função dos ganhos proporcional, integral e derivativo (constantes ajustáveis  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ ).

A expressão anterior pode ainda ser apresentada sob a seguinte forma:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.10)$$

Os controladores do tipo PID são adaptáveis à resolução de uma vasta gama de problemas de controlo, representando mais de 95% dos casos de controlo industrial, apesar de na verdade uma parte significativa serem controladores PI (do tipo proporcional-integral).

A figura 4.18 serve o propósito de representar cada uma das parcelas da resposta do controlador PID em relação ao erro: no instante  $t$  o termo proporcional depende do valor instantâneo do erro (presente); a parcela integral baseia-se no integral do erro acumulado, até ao instante  $t$ , representada pela zona a cinzento (passado); o termo derivativo estima a variação do erro projectando-o no instante  $t + T_d$ , com base na derivada da função de erro para o instante  $t$  (futuro).

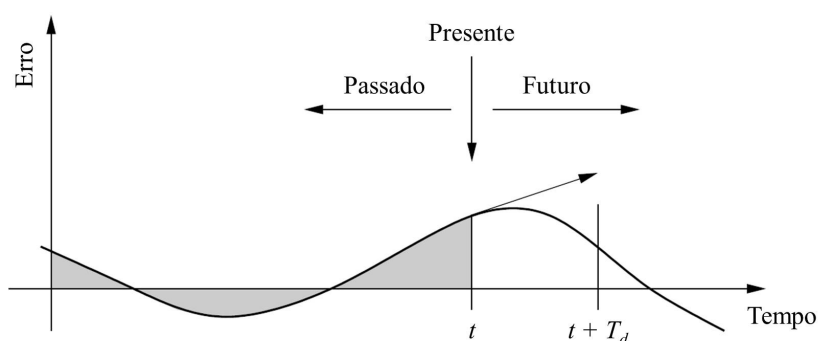


Figura 4.18: Representação das parcelas de acção de um controlador PID em relação ao erro. Adaptado de [4].

### 4.4.2 Critérios de desempenho do controlo

Um dos principais problemas relacionados com o *design* e teste de sistemas de controlo prende-se, muitas vezes, com a imprevisibilidade das excitações que actuam sobre o sistema. Não é praticável o estudo de todas as acções possíveis, nem a optimização de um sistema de controlo para todas as

situações, primeiramente porque a optimização de um certo aspecto do desempenho, pela variação de um parâmetro, é normalmente contraproducente noutra aspecto. Pretende-se assim encontrar um compromisso entre os vários aspectos em consideração, optimizando-se consoante as necessidades do controlo [33].

Na prática, a avaliação do desempenho de sistemas de controlo é feita com o auxílio a sinais de teste que normalmente traduzem funções muito simples. São usualmente utilizadas funções em forma de degrau (do inglês *step function*) ou rampa, ou ainda funções sinusoidais, um pouco mais complexas. Regra geral os sistemas de controlo cujo *design* se baseia na análise dos sinais de testes mencionados, têm um desempenho aceitável quando sujeitos a acções reais [33].

Os critérios de desempenho do controlo que serão definidos nesta secção, com o intuito de avaliar parametricamente a actuação do controlo, têm por base a caracterização da resposta a um sinal de referência sob a forma de degrau (do inglês *step input*), o sinal mais comumente utilizado.

Uma função em degrau é definida pela seguinte expressão:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < 0 \\ A, & \text{se } t > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

em que  $A$  é uma constante.

Esta função é representada graficamente na figura 4.19.

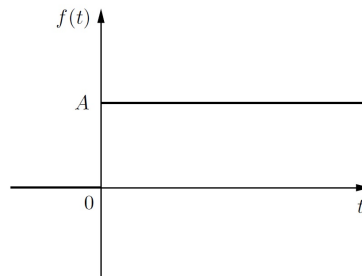


Figura 4.19: Função degrau. Adaptado de [33].

Note-se que a função é descontínua e não está definida para  $t = 0$ , tornando impraticável a sua implementação real, apesar de ser uma abstração conveniente e muito utilizada no estudo de sinais de teste e nas consequentes respostas de sistemas de controlo [4, 33].

A resposta de um sistema de controlo, em geral e também no caso particular da função degrau, consiste em duas parcelas, a resposta transitória e a resposta estacionária. A resposta transitória corresponde ao primeiro período temporal da resposta e reflecte, sob a forma de oscilações amortecidas, o desfazamento entre a condição inicial e a parcela estacionária. Após a resposta transitória, que tende a desaparecer à medida que o tempo passa, a resposta torna-se estacionária a longo prazo [4, 33].

Uma resposta típica a uma força unitária (função degrau, definida na equação 4.11, com a constante  $A = 1$ ) é apresentada pela figura 4.20. Nesta figura estão também representados os critérios de desempenho que serão definidos em seguida.

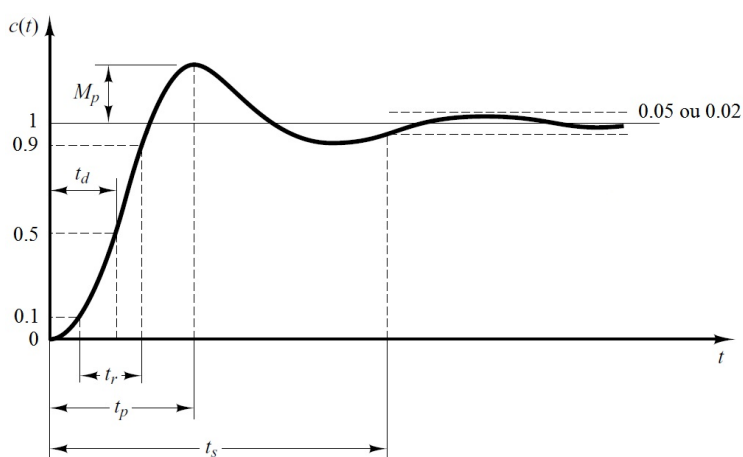


Figura 4.20: Resposta típica a uma força unitária. Adaptado de [28].

Os critérios de desempenho são baseados na definição dos seguintes parâmetros:

- Tempo de atraso,  $t_d$  (*delay time*), representa o tempo que a resposta demora a atingir, pela primeira vez, metade do seu valor final (estacionário).
- Tempo de subida,  $t_r$  (*rise time*), traduz o intervalo de tempo necessário para a resposta subir de 10% para 90% do seu valor final (podendo ser adoptados outros intervalos).
- Tempo de pico,  $t_p$  (*peak time*), corresponde ao tempo que leva à resposta atingir o primeiro pico acima do seu valor de referência.
- Excesso máximo,  $M_p$  (*maximum overshoot*), equivale à máxima percentagem de desvio da resposta acima do valor de referência e é calculado pela expressão:

$$M_p = \left[ \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \right] \times 100\% \quad (4.12)$$

- Tempo de estabilização,  $t_s$  (*settling time*), representa o tempo necessário para a resposta estabilizar dentro de uma margem, geralmente 2% ou 5%, do seu valor final. Neste trabalho será utilizada uma margem de 5%.

Estes parâmetros são utilizados, por exemplo no estudo de dados experimentais, para analisar a influência de diferentes calibrações na resposta de um sistema de controlo, ao optimizar o seu comportamento consoante as necessidades. Pode-se fazer um paralelismo entre o que foi abordado na secção 4.4.1, sobre a influência de cada um das constantes (proporcional, integral e derivativa), e a utilização dos parâmetros acima definidos, traduzindo essa influência em dados concretos.

### 4.4.3 Calibração do controlador

A calibração do controlador traduz o processo de escolha dos parâmetros das acções de controlo ( $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ ) para alcançar o desempenho desejado deste. Em teoria, o ideal seria determinar um modelo matemático que descrevesse o sistema ou uma abordagem analítica da calibração, para a obtenção destes parâmetros. Na prática, a obtenção destes modelos matemáticos é um processo muito complexo. No caso em estudo isto deve-se tanto ao comportamento não linear de histerese do material, como à variação das características deste, durante carregamentos cíclicos, pelo que se opta por uma calibração experimental [18].

Ziegler e Nichols estudaram metodologias experimentais para a determinação de valores para o ganho proporcional  $K_p$ , tempo integral  $T_i$  e tempo derivativo  $T_d$  que garantam um controlo satisfatório. Estes métodos são baseados na avaliação das características da resposta de um elevado número de sistemas de controlo e podem ser aplicados *in situ*. No desenvolvimento da metodologia, Ziegler e Nichols observaram que uma parte muito significativa dos sistemas de controlo apresentam uma resposta transitória em forma de S, como se representa na figura 4.21, pelo que desenvolveram um método (denominado como o primeiro) que se propõe específico para estes casos. Se a resposta não cumprir este critério, de seguir uma curva em forma de S, terá que ser utilizado outro método [28, 33].

Neste trabalho o controlador estudado apresenta uma resposta semelhante ao acima descrito, pelo que será utilizado o primeiro método de Ziegler e Nichols na sua calibração.

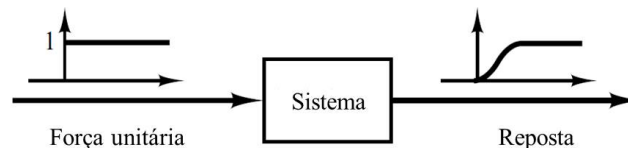


Figura 4.21: Resposta em malha aberta de um sistema a uma força unitária. Adaptado de [28].

A curva em forma de S pode ser caracterizada por duas constantes, o tempo de atraso  $L$  e a constante de tempo  $T$ . Obtêm-se estas duas constantes com o auxílio de uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva, determinando os pontos de intersecção entre a linha tangente, tanto com o eixo das abcissas (tempo) como com uma recta sobreposta à resposta do sistema em estado estacionário,  $c(\infty) = K$ . Esta caracterização pode ser mais facilmente compreendida visualizando a figura 4.22.

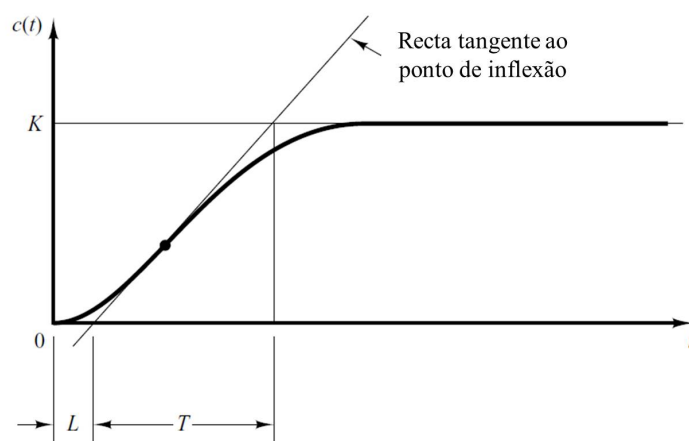


Figura 4.22: Constantes  $L$  e  $T$  definidas segundo o primeiro método de Ziegler e Nichols. Adaptado de [28].

Ziegler e Nichols propuseram que os parâmetros de calibração sejam determinados através das relações entre os valores  $L$  e  $T$  apresentadas na tabela que se segue.

Tabela 4.3: Resumo da regra de calibração proposta por Ziegler e Nichols no primeiro método. Adaptado de [28].

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

## 4.5 Software e hardware de controlo

### 4.5.1 Software de controlo

Como já foi referido o controlo do actuador é efectuado através de algoritmos implementados em LabVIEW, na sua versão 9.1, no âmbito deste trabalho. O LabVIEW é uma plataforma de *design* de sistemas que se baseia numa linguagem de programação gráfica desenvolvida pela empresa National Instruments. Permite a aquisição e análise de dados e o controlo de instrumentação física, num interface gráfico e intuitivo, a partir de uma série de sistemas operativos, como o Microsoft Windows<sup>®</sup> utilizado no computador utilizado.

Os programas e subrotinas implementados em LabVIEW são denominados de instrumentos virtuais ou VI (do ingles *virtual instruments*) e são compostos por um painel frontal (*front panel*) e um diagrama de bloco (*block diagram*).

No presente estudo interessa implementar dois programas, que permitam introduzir um sinal de referência no sistema e que possibilitem a leitura da resposta, o primeiro em malha aberta (para a calibração) e o segundo em malha fechada (para o controlo).

#### 4.5. SOFTWARE E HARDWARE DE CONTROLO

Em ambos os casos são utilizados VIs denominados *DAQ Assistant Express* que, usando o *software* NI-DAQmx, possibilitam a leitura ou a criação de sinais analógicos, provenientes ou introduzidos em instrumentos, após a sua passagem por módulos de conversão de sinal. Estes VIs podem ser divididas em dois tipos, as de entrada e as de saída de dados, denominadas neste caso em concreto, respectivamente de DAQ Leituras e DAQ Fonte, e são apresentadas na figura 4.23.

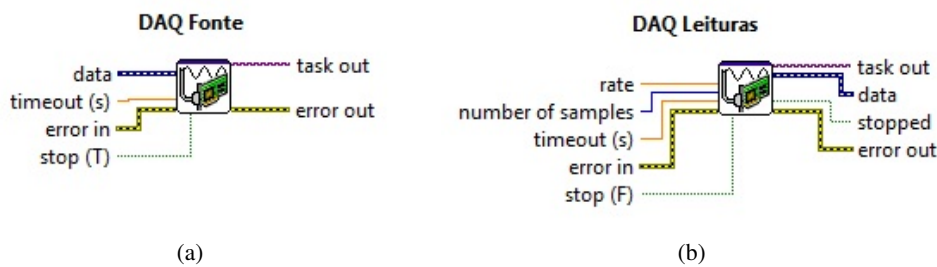


Figura 4.23: Instrumento virtual DAQ Assistant Express.

O VI denominado de DAQ Fonte comunica com a fonte de alimentação programável, após a conversão digital-analógico do sinal, permitindo a transmissão da voltagem definida pelo programa. O VI DAQ Leituras recebe as medições provenientes da célula de carga, do sensor *laser* e do sensor termopar, permitindo a sua interpretação e análise pelo *software*. Em ambos os casos a entrada/saída de dados é feita pelo canal *data*.

O sinal transmitido à fonte de alimentação pelo VI DAQ Fonte tem que ser definido *a priori*. Quando o sistema é implementado em malha aberta este sinal é concretamente definido pelo utilizador, podendo-se optar por um sinal que traduza uma função degrau, ou seja, um salto repentino do valor da voltagem, ou optar por uma variação gradual do valor do sinal, modelado por exemplo a partir de uma função sinusoidal com uma frequência muito pequena. O primeiro caso pode ser facilmente implementado pela introdução de um controlador numérico, em que é introduzido o valor pretendido para o sinal. No segundo caso poderá ser utilizado um VI semelhante ao apresentado na figura 4.24, em que se define qual o tipo de função a simular (por exemplo sinusoidal, quadrada, triangular, etc.).

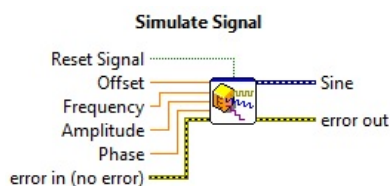


Figura 4.24: Instrumento virtual Simulate Signal.

Dos campos de entrada deste VI interessa definir os campos do *offset* que define o valor de equilíbrio da função, da frequência *frequency* e da amplitude.

Por forma a implementar o controlo em malha fechada, é utilizado um algoritmo de controlo PID, disponível através do VI apresentado na figura 4.25(a). Os principais dados de entrada presentes neste VI

são: o sinal de referência traduzido pelo *setpoint*; a variável do processo (*process variable*) que representa a variável medida (força) que se propõe controlar; os ganhos PID (*PID gains*), nomeadamente  $K_p$ ,  $T_i$  (em minutos) e  $T_d$  (em minutos).

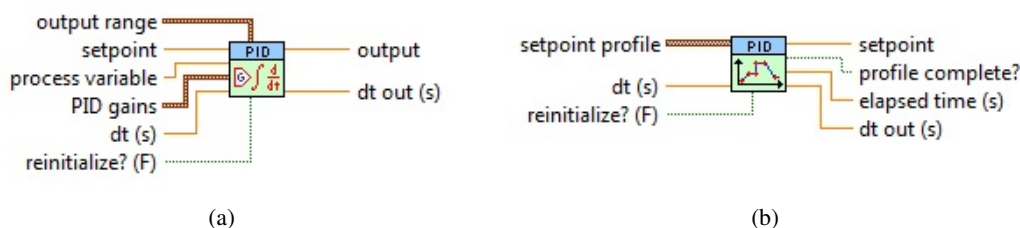


Figura 4.25: Instrumentos virtuais (a) PID e (b) Setpoint Profile.

O VI PID retorna como resultado, após a entrada dos dados mencionados, a variável de processo afectada pelo controlo PID. Este sinal será por sua vez transmitido ao VI DAQ Fonte.

Importa referir ainda que o sinal de referência (*setpoint*) foi modelado recorrendo a um VI, chamado PID Setpoint Profile, apresentado na figura 4.25(b), que permite a definição de patamares para o sinal de referência. Estes patamares podem conduzir a funções em forma de rampa ou degrau. Um exemplo dos patamares definidos e da função resultante para estes é apresentado na figura 4.26.

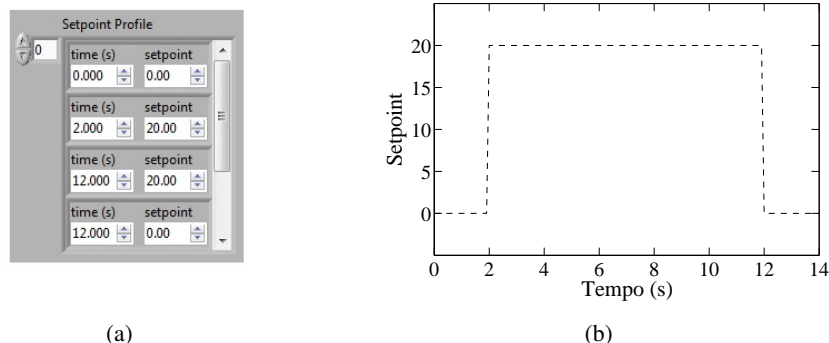


Figura 4.26: Exemplo de patamares definidos no instrumento virtual PID Setpoint Profile e o gráfico da função resultante.

Em seguida, na figura 4.27, apresenta-se o diagrama de bloco de umas das rotinas desenvolvidas em LabVIEW, neste caso em particular a rotina utilizada no controlo da força de actuação. Esta rotina foi desenvolvida no âmbito deste trabalho, tendo porém como base algumas rotinas anteriormente desenvolvidas pelo Professor Filipe Santos. É possível observar em primeiro lugar o VI relativo à leitura de dados, onde se introduzem na rotina os dados provenientes da célula de carga, do sensor *laser* e do termopar. Neste caso são os valores medidos pela célula de carga que são utilizados como variável de processo (do inglês *process variable*) no controlo PID e que são transmitidos, depois do devido controlo, para a fonte de alimentação sob a forma de corrente eléctrica. Existe ainda no final da rotina a possibilidade de gravação dos dados, para posterior análise destes.

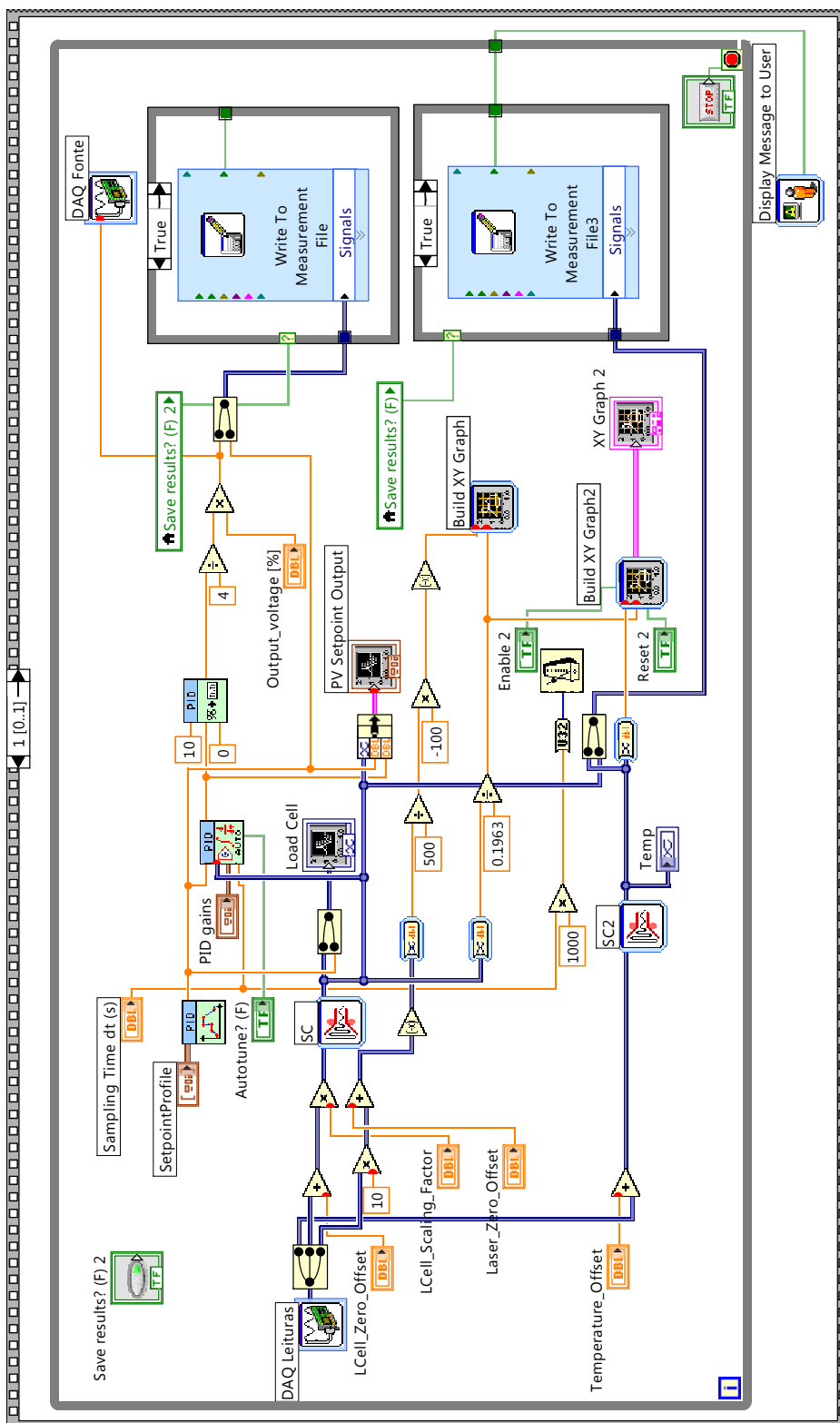


Figura 4.27: Diagrama de bloco da rotina de controlo da força de actuação.

### 4.5.2 Hardware de controlo

Para além do *software* instalado no computador, é necessário transmitir os dados gerados pelo *software* à instrumentação de medição (célula de carga, sensor *laser* e sensor termopar) e actuação (fonte de alimentação), recorrendo-se a *hardware* específico. Este *hardware* é compatível com o *software* LabVIEW, uma vez que todos os seus componentes são também produzidos pela empresa National Instruments.

O sistema de aquisição de dados (DAQ) permite converter sinais analógicos para digital (da instrumentação de medição para o computador) e sinais digitais para analógico (do computador para a fonte de alimentação). Esta sistema DAQ encontra-se fisicamente implementado no computador e materializa-se num cartão de aquisição denominado NI PXI-6221 (PCI eXtensions for Instrumentation) com duas saídas e 16 entradas analógicas.

A transmissão do sinal de saída do sistema DAQ até à fonte de alimentação é feita através de um conector NI SCB-68 (do inglês *Shielded I/O Connector Block*).

O sinal proveniente das medições efectuadas pelo sensor termopar é conectado ao sistema DAQ por um módulo NI SCXI-1112 (do inglês *Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation*) com oito canais, específico para termopares.

Tanto o sensor *laser* como a célula de carga são ligados a um módulo NI SCXI-1314 que está conectado ao sistema DAQ.

## Capítulo 5

# Resultados experimentais

### 5.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os testes efectuados sobre o actuador e apresentados os resultados obtidos, tanto para a calibração dos parâmetros de controlo, como no estudo da sensibilidade e optimização destes parâmetros e ainda na eficácia do controlo da resposta a vários sinais de referência.

### 5.2 Intervalo operacional

Uma vez que se optou pela activação eléctrica na actuação do fio de SMA, relacionando os conceitos abordados na secção 4.2.2 sobre o efeito de Joule com os resultados dos testes DSC apresentados na secção 4.2.5, importa definir um intervalo operacional de diferencial de potência eléctrica (voltagem) a introduzir no elemento de SMA. Por outras palavras, é essencial determinar o intervalo de voltagens que induzem um aquecimento suficiente e necessário à transformação inversa por parte do material.

Neste sentido procurou-se relacionar a resposta do fio de SMA em termos de temperatura e força com um aumento lento da voltagem introduzida no fio. A voltagem introduzida variou sinusoidalmente entre um mínimo de 0 V e um máximo de 8 V, com uma frequência de 0,0005 Hz, ou seja, o meio ciclo entre o patamar mínimo e máximo durou 1000 segundos, cerca de 16 minutos. Estas relações são demonstradas na figura 5.1.

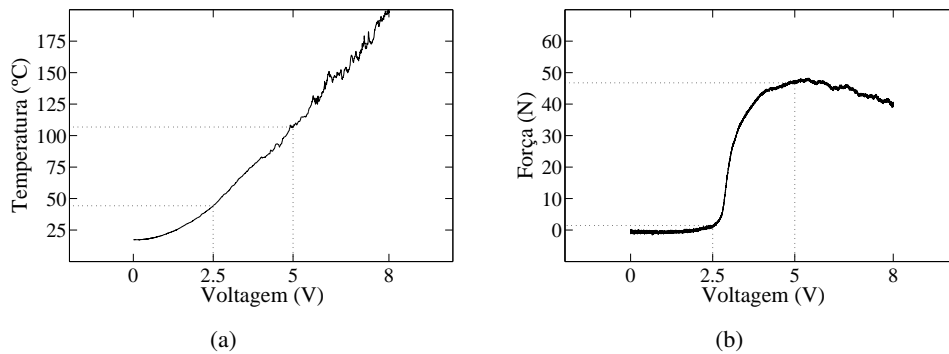


Figura 5.1: Relações entre (a) voltagem e temperatura e (b) voltagem e força.

Verifica-se pela observação da figura 5.1(b) que a resposta útil em termos de força gerada pelo fio é conseguida aproximadamente entre voltagens de 2,5 V e 5 V. Para voltagens abaixo do valor de 2,5 V a resposta é insignificante e para valores acima de 5 V a resposta mantém-se quase constante, existindo mesmo um decréscimo desta para valores superiores. O valor máximo registado em termos de força é de 48,25 N.

Na figura 5.1(a) é possível relacionar estes valores de voltagem com a temperatura medida no fio, aproximando-se estes valores medidos, 44 °C para os 2,5 V e 106 °C para os 5 V, dos valores de  $A_s = 45$  °C e  $A_f = 95$  °C, apontados na secção 4.2.5.

No que toca à transformação directa, o arrefecimento do fio depende exclusivamente do convecção livre do ar. Este facto é de extrema importância em dois pontos: primeiro dita a impossibilidade de um controlo activo na fase de arrefecimento, pois a única variável controlada, a voltagem introduzida no fio, deve assumir nesta fase 0 V, pois qualquer outro valor leva ao aquecimento do fio; em segundo lugar introduz perturbações (uma vez que não é possível controlar as movimentações de ar à volta do fio de maneira eficaz) durante uma fase em que não existe possibilidade de controlo.

Existe a possibilidade de atenuação destes problemas, primeiramente através da introdução de uma mola numa das extremidade do fio (o que é feito numa das configurações deste trabalho), levando a uma mais rápida extensão do fio, mas também se poderá tentar acelerar o arrefecimento do fio com a introdução de ventoinhas controladas.

### 5.3 Calibração dos parâmetros de controlo

A calibração do controlador é efectuada em malha aberta e foi feita para a configuração que permite o controlo da força, com a extremidade do fio de SMA fixa à estrutura de suporte.

Partindo dos resultados obtidos na secção 5.2 foi estipulado um intervalo entre os 2,5 V e os 5,5 V, em patamares de 0,5 V, para as calibrações.

Em seguida apresentam-se os gráficos que ilustram a resposta em termos de força resultante da introdução destas voltagens constantes no fio de SMA.

#### 5.3.1 Calibração para o controlo da força

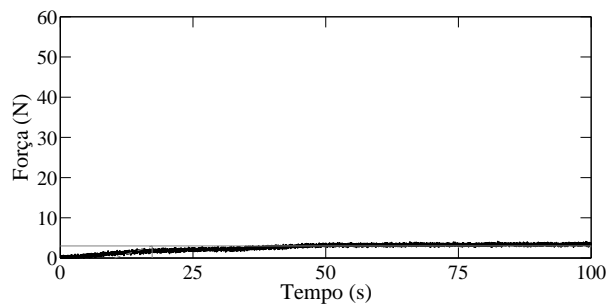


Figura 5.2: Resposta a 2,5 V em malha aberta para calibração em termos de força.

### 5.3. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLO

---

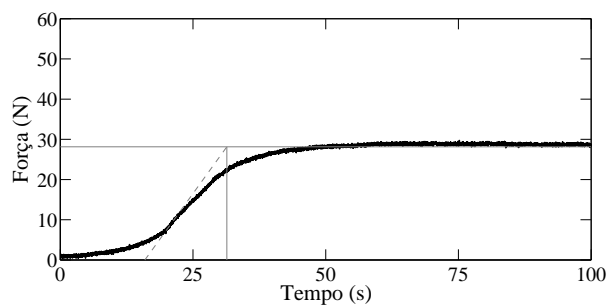


Figura 5.3: Resposta a 3,0 V em malha aberta para calibração em termos de força.

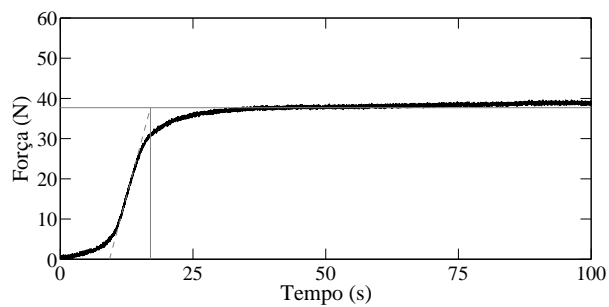


Figura 5.4: Resposta a 3,5 V em malha aberta para calibração em termos de força.

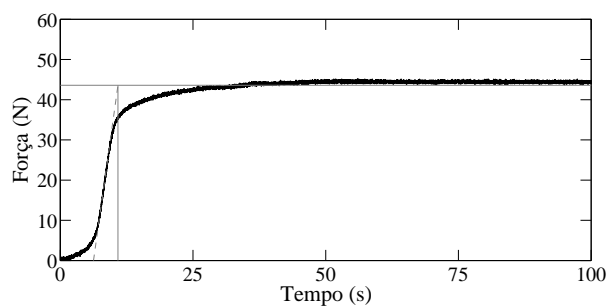


Figura 5.5: Resposta a 4,0 V em malha aberta para calibração em termos de força.

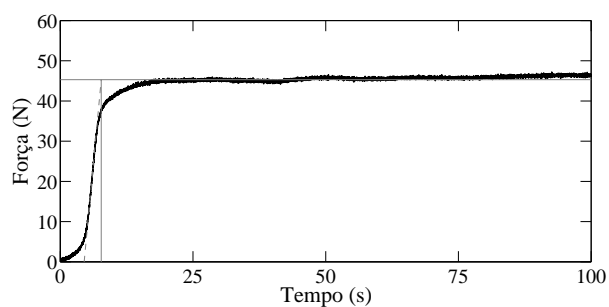


Figura 5.6: Resposta a 4,5 V em malha aberta para calibração em termos de força.

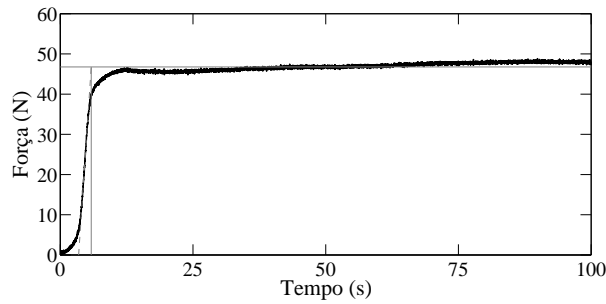


Figura 5.7: Resposta a 5,0 V em malha aberta para calibração em termos de força.

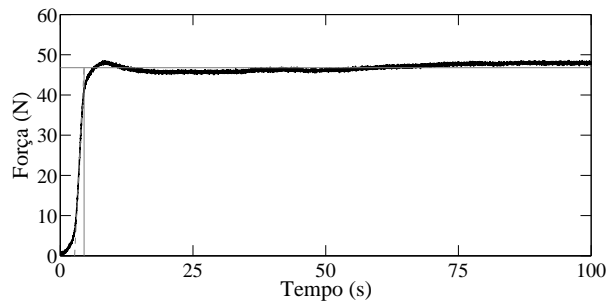


Figura 5.8: Resposta a 5,5 V em malha aberta para calibração em termos de força.

Os valores obtidos para as constantes e parâmetros de calibração estão resumidos na tabela 5.1. Estes foram obtidos através da tabela 4.3, que traduz o primeiro método proposto por Ziegler e Nichols, para controladores proporcionais (P), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID). Note-se que apenas se apresentam os valores entre os 3 V e os 5.5 V, já que para voltagens menores que 3 V os resultados não são coerentes, devido à resposta ser pouco significativa.

Tabela 5.1: Valores para a calibração do controlo da força.

		3 V	3,5 V	4 V	4,5 V	5 V	5,5 V
	L	0.27	0.15	0.10	0.08	0.06	0.05
	T	0.26	0.13	0.08	0.05	0.04	0.03
PID	$K_p$	1.16	1.00	0.88	0.86	0.82	0.79
	$T_i$	0.53	0.31	0.21	0.15	0.12	0.09
	$T_d$	0.13	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02
PI	$K_p$	0.87	0.75	0.66	0.64	0.61	0.59
	$T_i$	0.88	0.52	0.35	0.25	0.19	0.15
P	$K_p$	0.97	0.83	0.74	0.71	0.68	0.66

Importa referir que os valores dos parâmetros  $L$  e  $T$ , assim como dos  $T_i$  e  $T_d$  estão apresentados em minutos.

Por forma a aferir a adequabilidade destes parâmetros, foi testada a resposta do sistema de controlo a um sinal de referência em forma de degrau, utilizando os parâmetros de uma das voltagens de calibração

### 5.3. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLO

intermédia, neste caso os 4,5 V. Para o sinal de referência optou-se por um valor de 35 N, o que corresponde a 72,5% da força máxima, 48,25 N, obtida na secção 5.2.

A resposta P, PI e PID obtida com os valores calibrados é apresentada na figura 5.9.

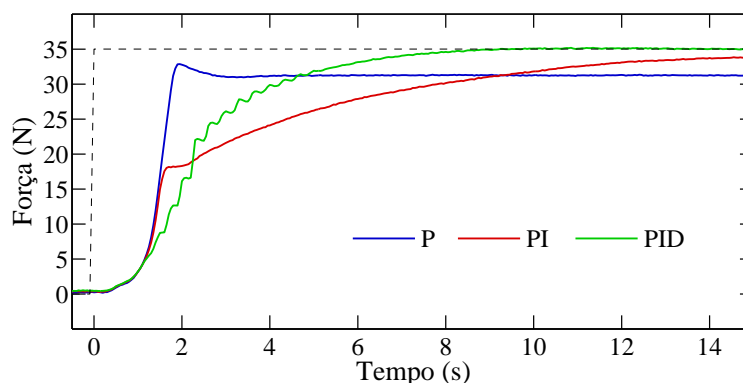


Figura 5.9: Resposta P, PI e PID com parâmetros calibrados pelo primeiro método de Ziegler e Nichols.

Nesta figura é possível observar a influência de cada um dos tipos de acções de controlo sobre a resposta do sistema, traduzindo em termos práticos aquilo que foi anteriormente mencionado em termos teóricos na secção 4.4.1. Apresentam-se ainda, na tabela 5.2, os critérios de desempenho definidos na secção 4.4.2 calculados para estes três casos.

Tabela 5.2: Critérios de desempenho do controlo P, PI e PID.

	$t_d$	$t_r$	$t_p$	$M_p$	$t_s$
	(s)	(s)	(s)	(%)	(s)
P	1.512	0.773	1.925	-	-
PI	1.597	8.557	-	-	12.481
PID	2.223	3.858	-	-	6.174

No controlo apenas com acção proporcional (P) observa-se que o valor de  $K_p$ , resultante da calibração, é demasiado pequeno uma vez que a resposta estabiliza sem se aproximar do valor desejado, ou seja, possui um erro residual em estado estacionário. Ao adicionar-se a parcela integral (PI), apesar de se verificar uma degradação da resposta em fase transitória, a resposta tende a eliminar o erro em estado estacionário ao longo do tempo. O controlo PID, à semelhança do PI, piora a resposta transitória do controlo, mas também reduz mais eficazmente o erro em estado estacionário, diminuindo o tempo de estabilização ( $t_s$ ) em relação ao controlo PI.

Fica claro que os valores obtidos pela calibração mencionada não produzem uma resposta de controlo óptima, mas aproximam-se razoavelmente do sinal de referência predefinido. Assim, servem estes valores de ponto de partida para a optimização dos parâmetros do controlo e, conseqüentemente, da resposta de controlo. Este processo será levado a cabo de forma experimental e por meio de tentativa e erro, procurando-se avaliar a influência de pequenas variações nos parâmetros de controlo na resposta.

## 5.4 Influência dos ganhos na resposta de controlo

Nesta secção será estudada a influência dos ganhos proporcional, integral e derivativo na resposta do controlador. Para tal serão utilizados dois tipos de sinal de referência. O primeiro será semelhante ao utilizado na secção anterior para a comparação da resposta dos controladores do tipo P, PI e PID, ou seja, um sinal do tipo degrau. O segundo sinal será modelado através de uma função sinusoidal, caracterizada pela sua frequência, amplitude e ponto de equilíbrio (ponto sobre o qual a função oscila e que funciona com o um *offset*).

### 5.4.1 Função em degrau

Procede-se assim a uma variação arbitrária dos parâmetros de calibração  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  de modo a evidenciar influência destes e a sensibilidade da resposta do sistema a esta variação, apresentando-se as diferentes respostas à função em degrau, nas figuras 5.10, 5.11 e 5.13. Os valores dos critérios de desempenho do controlo obtidos para a variação de cada um dos diferentes ganhos estão resumidos nas tabelas 5.3, 5.4 e 5.5.

Na figura 5.10 estão graficamente representadas as respostas de controlo obtidas para valores de 1, 2 e 10 para  $K_p$ .

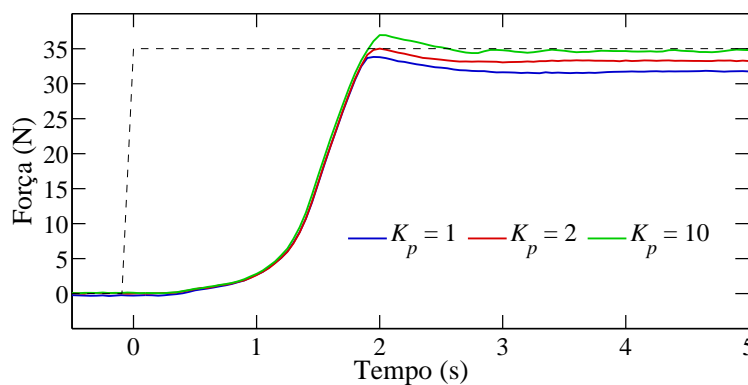


Figura 5.10: Resposta para diferentes valores de  $K_p$ .

Na seguinte tabela exibem-se os critérios de desempenho determinados para os valores de  $K_p$  representados na figura 5.10.

Tabela 5.3: Critérios de desempenho para diferentes valores de  $K_p$ .

$K_p$	$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)
1	1.533	0.759	1.934	-3.32	-
2	1.531	0.726	1.997	0.04	-
10	1.512	0.726	2.020	5.77	2.085

É possível observar que o controlador se torna mais responsivo à medida que o valor de  $K_p$  aumenta, diminuindo o tempo de atraso  $t_d$  e tendencialmente diminuindo o tempo de subida  $t_r$ , ao mesmo tempo que o *overshoot* máximo aumenta. Em estado estacionário o erro, apesar de sempre presente, diminui com o aumento do ganho proporcional, sendo apenas no último dos três casos ( $K_p = 10$ ) que o valor da resposta em estado estacionário se encontra dentro da margem proposta para  $t_s$ . Verifica-se também que a resposta se tornar mais oscilatória com o aumento de  $K_p$ .

A adição de uma parcela integral no controlo é apresentada de seguida, variando os valores do tempo integral ( $T_i$ ) e mantendo  $K_p$  constante e igual a 1, tornando assim o tipo de controlador em PI.

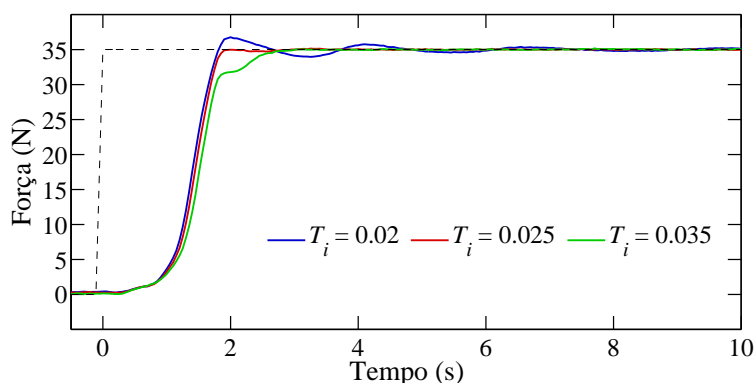


Figura 5.11: Resposta para diferentes valores de  $T_i$  ( $K_p = 1$ ).

Na tabela 5.4 são mostrados os valores obtidos, para os diferentes valores de  $T_i$ , em termos de critérios de desempenho.

Tabela 5.4: Critérios de desempenho para diferentes valores de  $T_i$  ( $K_p = 1$ ).

$T_i$ (min)	$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)
0.02	1.398	0.705	1.999	5.04	2.009
0.025	1.440	0.712	2.011	-0.04	1.785
0.035	1.507	0.819	3.145	0.05	2.318

Recorde-se que o valor de  $T_i$  é inversamente proporcional a  $K_i$ , através da igualdade  $K_i = K_p/T_i$ . Assim, à medida que o valor de  $T_i$  diminui, aumenta a contribuição da parcela integral no controlador, já que  $K_i$  cresce.

Em relação ao controlador apenas proporcional, a adição do termo integral influencia a resposta de controlo em dois pontos principais. Primeiro, o erro em estado estacionário diminui, aproximando a resposta ao sinal de referência a longo prazo. Em segundo lugar, torna o sistema significativamente mais oscilatório quando a parcela integral se torna mais relevante (para valores de  $T_i$  menores). Estes dois pontos vão de encontro ao esperado na secção 4.4.

Pode-se verificar então que, na medida em que se diminui o valor do tempo integral ( $T_i$ ), a responsividade do controlador aumenta, diminuindo o tempo de atraso ( $t_d$ ), o tempo de subida ( $t_r$ ) e o tempo de pico

( $t_p$ ). Tendencialmente, o *overshoot* aumenta com a diminuição de  $T_i$ , assim como o comportamento oscilatório da resposta.

Importa mencionar, como é possível observar pela figura 5.11, que se evidenciam dois tipos diferentes de resposta. Para valores mais elevados do tempo integral, a parcela integral manifesta-se apenas na redução do erro em estado estacionário, enquanto que para valores mais diminutos, a resposta também se torna visivelmente mais oscilatória. O valor de  $T_i = 0.025$  min estabelece aproximadamente esta fronteira. Por forma a esta evolução da resposta se tornar mais perceptível, apresenta-se de seguida a figura 5.12, onde se representam graficamente as respostas de controlo com uma cor mais escura à medida que  $T_i$  diminui.

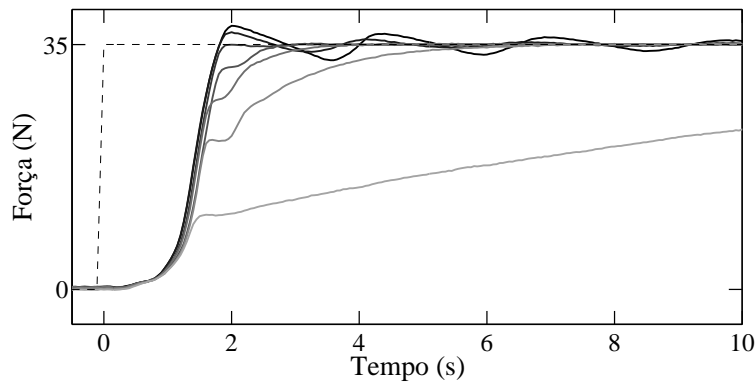


Figura 5.12: Evolução da resposta para diferentes valores de  $T_i$  ( $K_p = 1$ ).

De forma a mais claramente se mostrar a influência da variação do tempo derivativo ( $T_d$ ) sobre a resposta de controlo PID, optou-se por utilizar um sinal de referência de 25 N, ao invés de 35 N como nos dois casos anteriores.

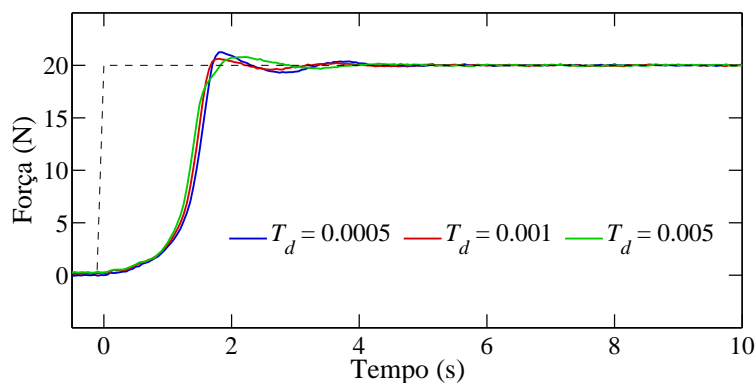


Figura 5.13: Resposta para diferentes valores de  $T_d$  ( $K_p = 1$  e  $T_i = 0.03$ ).

A tabela seguinte apresenta, analogamente às tabelas 5.3 para  $K_p$  e 5.4 para  $T_i$ , os valores dos critérios de desempenho de controlo para diferentes valores do tempo derivativo.

Tabela 5.5: Critérios de desempenho para diferentes valores de  $T_d$  ( $K_p = 1$  e  $T_i = 0.03$ ).

$T_d$ (min)	$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$M_p$ (%)	$t_s$ (s)
0.0005	1.466	0.755	1.823	6.41	3.119
0.001	1.405	0.725	1.795	3.16	2.78
0.005	1.355	0.744	2.213	3.99	2.536

A influência do termo derivativo na resposta do controlador, com o aumento de  $T_d$ , traduz-se principalmente num suavizar da resposta transitória, resultando num pico menos pronunciado na curva da resposta, e numa mais rápida estabilização em torno do valor do sinal de referência, ou seja, num menor tempo de estabilização ( $t_s$ ). Observa-se que, apesar do tempo de atraso ( $t_d$ ) diminuir com o aumento do tempo derivativo ( $T_d$ ), a resposta do controlador tende a diminuir a sua taxa de variação perto dos valores de pico, suavizando-os e aumentando a estabilidade do sistema após este pico.

### 5.4.2 Função sinusoidal

A resposta do controlador a um sinal de referência sinusoidal foi estudada e apresenta nesta secção. Este tipo de sinal de referência pretende reproduzir a necessidade do controlador responder dinamicamente. Como já foi referido anteriormente, é espectável que neste tipo de sinal de referência a qualidade da resposta do controlador seja condicionada pela fase de arrefecimento, uma vez que nesta o controlo é passivo e depende apenas de fenómenos alheios ao sistema de controlo. Assim, apresenta-se de seguida esta fase, em que a força de actuação diminui dos 35 N até perto de 0 N ao longo do tempo, consequência do arrefecimento do fio de SMA.

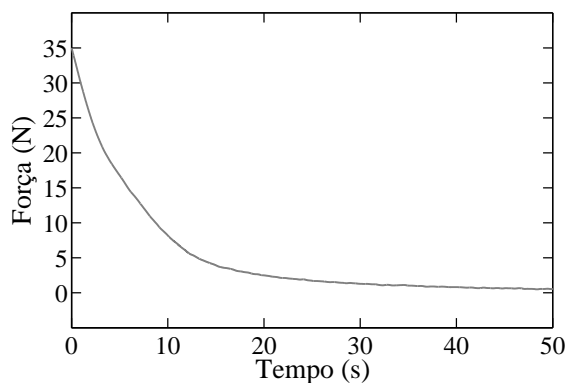


Figura 5.14: Diminuição do força, consequência do arrefecimento, ao longo do tempo.

Optou-se por estudar um sinal de referência com uma amplitude de 20 N, variando entre os 10 e os 30 N, um valor significativo em relação à força máxima de actuação. Da análise da figura 5.14 verifica-se que durante o arrefecimento, entre estes dois patamares passam cerca de 8 segundos. Assim, um ciclo completo (de aquecimento e arrefecimento) que se pretenda não ser condicionado pela fase de arrefecimento terá que ter um período superior a 16 segundos. Desde modo optou-se por estudar um

sinhal de referência com um período de 20 segundos, ou seja com uma frequência de 1/20 Hz. Em seguida apresentam-se as respostas do controlador para vários valores dos parâmetros de calibração.

Apresentam-se em seguida graficamente as respostas do controlador, apenas com parcela proporcional, para diferentes valores de  $K_p$  (representadas a preto) sobrepostas ao sinal de referência sinusoidal (representado a azul). Também se apresentam as relações de temperatura e tensão, ao longo dos ciclos, para cada uma das situações, em que o primeiro ciclo é apresentado a azul e o último a vermelho.

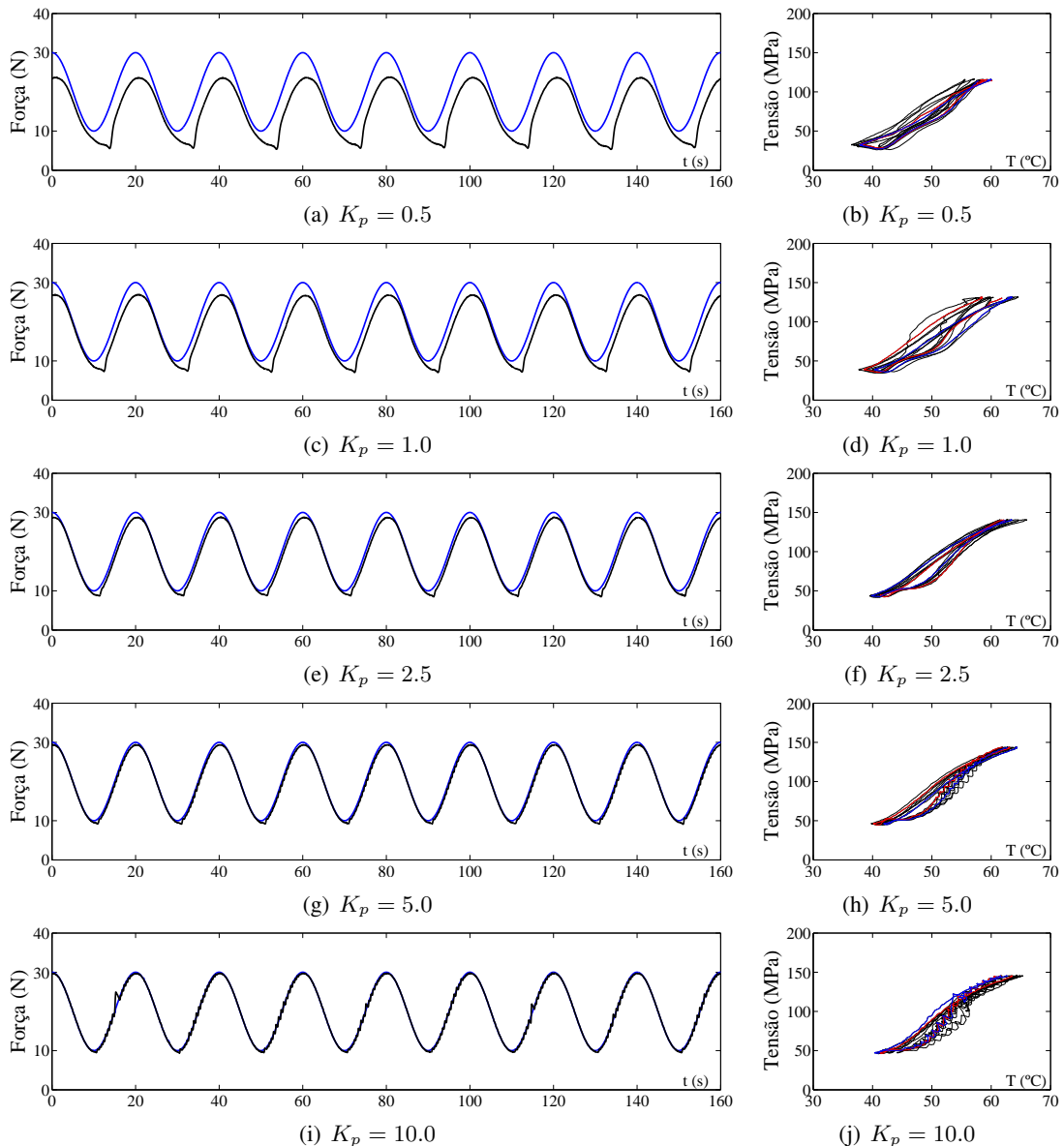


Figura 5.15: Resposta de controlo para uma função sinusoidal variando  $K_p$ .

Dos resultados obtidos, que podem ser observados na figura 5.15, para valores de  $K_p$  entre 0,5 e 10,0, verifica-se que a resposta do controlador acompanha razoavelmente a forma do sinal de referência sinusoidal. Apesar disso, para os valores mais baixos de  $K_p$  verifica-se um maior desfazamento entre

a resposta e o sinal de referência. Isto é espectável pelo que já foi mencionado anteriormente, uma vez que para baixos valores de  $K_p$  a resposta pode não conseguir atingir os valores do sinal de referência, algo que também foi verificado na secção anterior para a função em degrau. À medida que os valores de  $K_p$  aumentam, mais se aproxima em termos absolutos a resposta ao sinal de referência, atenuando-se o desfazamento presente nos primeiros gráficos. É ainda visível que a resposta se torna menos suave e mais oscilatória para os valores mais elevados de  $K_p$ , evidente nos gráficos que relacionam a temperatura com a tensão no fio.

De modo a traduzir objectivamente a qualidade da relação entre o sinal de referência sinusoidal e a resposta do controlador, optou-se por determinar o erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root-Mean-Square Error*) e o erro máximo. O RMSE traduz um erro médio ao longo dos resultados, sendo a sua expressão de cálculo apresentada na equação 5.1, enquanto o erro máximo quantifica a maior discrepância singular presente nos resultados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SP - PV)^2}{n}} \quad (5.1)$$

Em que  $SP$  representa o sinal de referência (*setpoint*) e  $PV$  a resposta do controlador (*process variable*).

Tabela 5.6: Erro quadrático médio e erro máximo da resposta de controlo para uma função sinusoidal variando  $K_p$ .

$K_p$	RMSE (N)	Erro máximo (N)
0.5	5.444	11.039
1.0	2.718	5.580
2.5	1.089	2.375
5.0	0.547	1.309
10.0	0.450	4.308

Como seria espectável, após a observação dos gráficos presentes na figura 5.15, os valores do erro quadrático médio decrescem à medida que o valor de  $K_p$  aumenta, reafirmando a qualidade da resposta do controlador em relação ao sinal de referência sinusoidal. Por outro lado, apesar de tendencialmente o erro máximo também diminuir em contraponto com o aumento do valor de  $K_p$ , quando  $K_p$  assume o maior valor considerado (10,0) verifica-se que o erro máximo contraria essa tendência. Isto deve-se ao comportamento mais oscilatório da resposta para valores elevados de  $K_p$ , traduzindo-se em reajustes mais bruscos como o que se verifica no patamar crescente entre os 10 e 20 segundos.

Em seguida apresentam-se os resultados da resposta do controlador quando actua, para além da parcela proporcional também uma parcela integral. Utilizam-se novamente os conceitos do erro quadrático médio e do erro máximo para quantificar a proximidade da resposta do controlador com o sinal de referência sinusoidal.

A parcela integral tomou o valor de 0,01 minutos para todas as respostas do tipo PI apresentadas em seguida. O primeiro caso considerado foi a adição desta parcela integral ao controlador com um valor de  $K_p = 0.5$ .

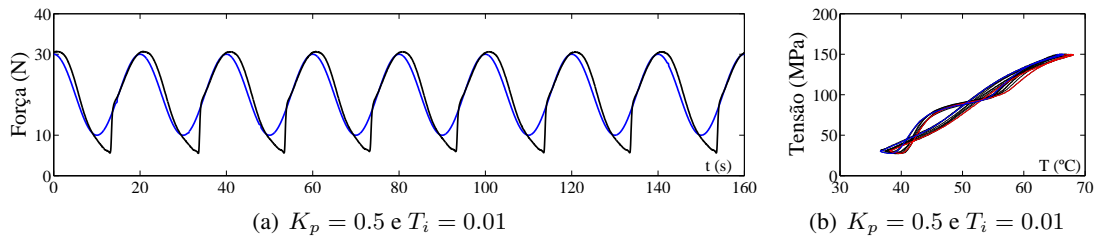


Figura 5.16: Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com  $K_p = 0.5$  e  $T_i = 0.01$ .

Tabela 5.7: Erro quadrático médio e erro máximo com  $K_p = 0.5$  e  $T_i = 0.01$ .

$K_p$	$T_i$	RMSE	Erro máximo
		(N)	(N)
0.5	0.01	2.683	9.633

Neste caso é possível observar, tanto graficamente como pelos valores de RMSE e do erro máximo, que a resposta do controlador melhorou significativamente com a adição da parcela integral, diminuindo o desfazamento ao longo da resposta, presente sem a parcela integral. O valor do erro quadrático médio diminuiu praticamente para metade do valor anterior (de 5,444 passou para 2,683), tendo o erro máximo uma queda menos acentuada mas ainda assim significativa.

Na figura 5.17 e tabela 5.8 apresentam-se os resultados relativos à adição da parcela integral no caso em que  $K_p$  toma um valor de 1,0.

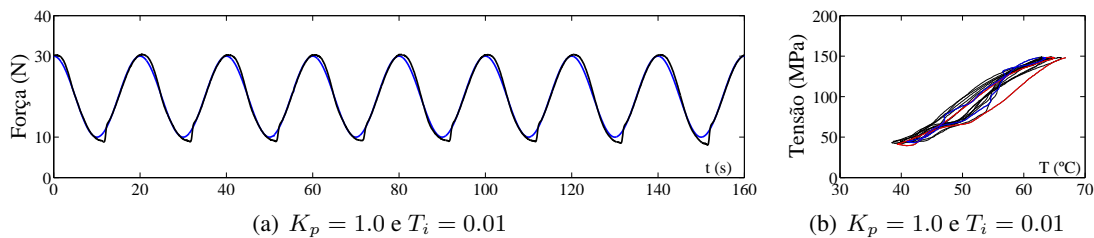


Figura 5.17: Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com  $K_p = 1.0$  e  $T_i = 0.01$ .

Tabela 5.8: Erro quadrático médio e erro máximo com  $K_p = 1.0$  e  $T_i = 0.01$ .

$K_p$	$T_i$	RMSE	Erro máximo
		(N)	(N)
1.0	0.01	0.730	2.953

À semelhança do que se verificou no caso anterior, em que  $K_p = 0.5$ , também neste caso existe uma melhoria significativa da resposta, observável graficamente e pelos valores de RMSE e do erro máximo, ambos com decréscimos significativos.

Em seguida apresentam-se os resultados que se verificaram para quando o controlador PI toma um valor de  $K_p = 5.0$  para além de  $T_i = 0.01$  minutos.

#### 5.4. INFLUÊNCIA DOS GANHOS NA RESPOSTA DE CONTROLO

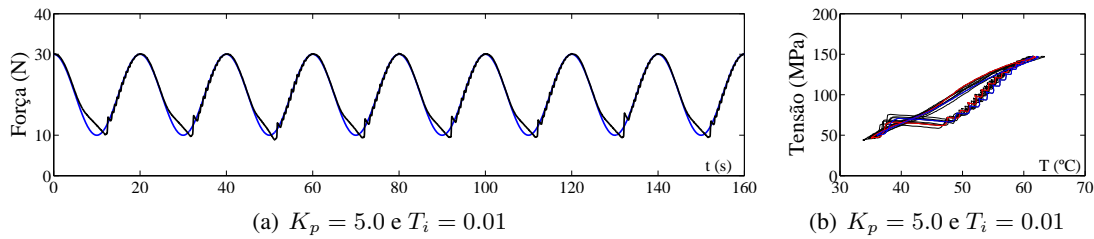


Figura 5.18: Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com  $K_p = 5.0$  e  $T_i = 0.01$ .

Tabela 5.9: Erro quadrático médio e erro máximo com  $K_p = 5.0$  e  $T_i = 0.01$ .

$K_p$	$T_i$	RMSE	Erro máximo
		(N)	(N)
5.0	0.01	0.896	3.219

Neste caso, ao contrário do que sucedeu nas anteriores duas situações, verifica-se uma degradação da resposta do controlador depois da adição da parcela integral. Gráficamente observa-se que, apesar do desfazamento em torno do sinal de referência sinusoidal ter desaparecido, a resposta é muito mais instável e com maior dificuldade em se ajustar em tempo útil à variação do sinal de referência. Também na amplitude dos valores do erro quadrático médio e do erro máximo se traduz esta degradação da resposta do controlador, aumentado em relação ao controlador apenas com a parcela proporcional.

Os resultados para um ganho proporcional igual a 10,0 são exibidos em seguida na figura 5.19 e na tabela 5.10.

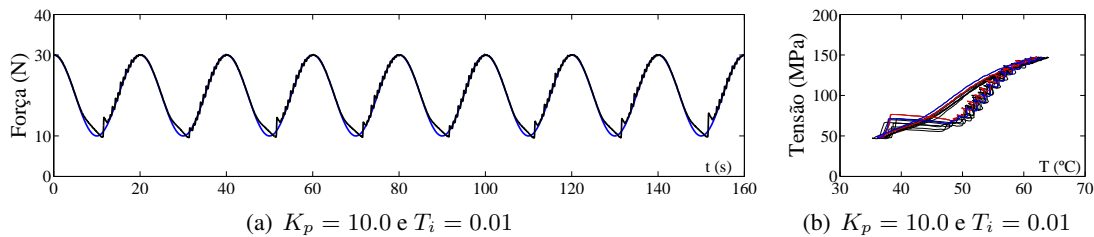


Figura 5.19: Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com  $K_p = 10.0$  e  $T_i = 0.01$ .

Tabela 5.10: Erro quadrático médio e erro máximo com  $K_p = 10.0$  e  $T_i = 0.01$ .

$K_p$	$T_i$	RMSE	Erro máximo
		(N)	(N)
10.0	0.01	0.754	4.277

Analogamente ao que se verificou no caso anterior, também a resposta do controlador neste caso se deteriorou com a adição da parcela integral. Mais uma vez isto é traduzido tanto graficamente como pelo valor obtido no erro quadrático médio, que aumentou. No entanto, a amplitude do erro máximo verificado manteve-se quase sem variação.

Com o intuito de avaliar a robustez da resposta do controlador, decidiu-se adicionar ruído, com carácter aleatório e uma amplitude de 5% em relação à amplitude do sinal de referência harmónico, ao caso em que os valores do ganho proporcional e do tempo integral são, respectivamente, de 5,0 e 0,01.

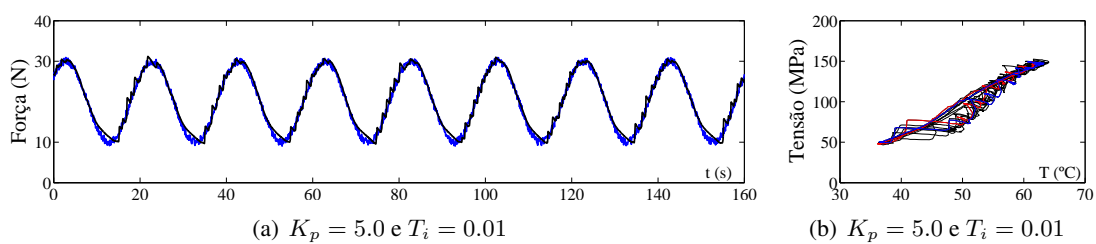


Figura 5.20: Resposta de controlo para uma função sinusoidal, com  $K_p = 5.0$  e  $T_i = 0.01$ .

Tabela 5.11: Erro quadrático médio e erro máximo com  $K_p = 5.0$  e  $T_i = 0.01$ .

$K_p$	$T_i$	RMSE	Erro máximo
		(N)	(N)
5.0	0.01	1.063	4.359

Apesar de, como aliás era esperado, a resposta do controlador apresentar maiores erros com a adição do ruído, os resultados exibidos demonstram que o controlador consegue acompanhar adequadamente a variação do sinal de referência.

## Capítulo 6

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste trabalho foi proposta a utilização de ligas com memória de forma como elemento activo num actuador, com o intuito de estudar a qualidade da sua resposta e a sua sensibilidade à variação de parâmetros de controlo. Estes parâmetros estão relacionados ao tipo de controlo utilizado, neste caso resultante da combinação de parcelas de controlo proporcional, integral e derivativo.

No que diz respeito à estratégia de *design* utilizada torna-se evidente que, como em qualquer outro processo deste género, as opções tomadas em favor de alguns aspectos condicionaram outros. No entanto procurou-se sempre que possível vincar mais os aspectos da simplicidade, da ligeireza, da fiabilidade e da eliminação de erros sistemáticos. Isto deve-se, como é óbvio, às vantagens intrínsecas das ligas com memória de forma, que passam pela possibilidade de *designs* compactos e leves, sendo também um material muito fiável. Neste ponto tornam-se relevantes as opções pelo método de activação eléctrico, por um tipo de actuador linear e pelo estudo apenas da força de actuação do fio de SMA.

Os resultados obtidos em malha aberta mostraram-se possíveis de repetir de forma razoavelmente precisa, sendo que durante o estado estacionário estes não sofrem grandes oscilações. Acresce a importância deste aspecto o facto do ambiente envolvente do controlador (temperatura ambiente e convecção do ar), que tem o potencial de afectar a sua resposta, não ser de todo controlado. Como foi visto, através ensaios realizados em malha aberta pode ser efectuada uma primeira calibração (pelo primeiro método proposto por Zielger e Nichols) para os parâmetros de controlo PID em malha fechada. Apesar desta calibração não produzir resultados óptimos, servem de um ponto de partida.

Em geral obtiveram-se resultados satisfatórios, em termos da resposta do controlador em malha fechada, em comparação com os sinais de referência propostos para estudo. Conseguiram-se verificar os pressupostos apresentados na secção 4.4 no que diz respeito à teoria de controlo, mais concretamente na influência de cada uma das acções de controlo (proporcional, integral e derivativa) e seus parâmetros ( $K_p$ ,  $K_i$  ou  $T_i$  e  $K_d$  ou  $T_d$ ) sobre a resposta do controlador. Pode-se resumir assim influência de cada um dos parâmetros em sobre a resposta do controlador ao sinal de referência em degrau em: o aumento do ganho proporcional  $K_p$  aumenta a responsividade, o carácter oscilatório e diminui erro em estado estacionário da resposta; a diminuição do tempo integral  $T_i$  leva a uma diminuição do erro em estado estacionário e a um aumento do carácter oscilatório da resposta; o aumento do tempo derivativo  $T_d$  traduz-se numa resposta transitória mais suave e uma mais rápida estabilização desta. Concluiu-se ainda que os controladores do tipo PI e PID se adequam de forma mais eficaz ao sinal de referência em degrau, através do resultados obtidos por estes em relação ao controlador apenas com a parcela proporcional.

Observou-se ainda que globalmente o controlador apresentou resultados positivos no que toca ao acompanhamento de um sinal de referência que segue uma função sinusoidal. Para os vários casos, com variação dos parâmetros de controlo, o controlador respondeu de forma bastante adequada, levando a crer na sua viabilidade em moldes e aplicações mais práticas. Neste ponto é necessária uma referência a um aspecto importante que é a relação entre a amplitude da força de actuação e a rapidez do actuador. Como já foi mencionado, uma das condicionantes neste estudo é o processo de arrefecimento do SMA, que tem um carácter passivo no que diz respeito ao controlo. Esta condicionante torna-se ainda mais relevante em sinais de referência como a função sinusoidal, em que metade de cada ciclo de actuação fica dependente do arrefecimento do material. Assim, torna-se evidente a dependência da amplitude da força máxima e mínima de cada ciclo com o período/frequência deste, ou seja, uma maior força de actuação necessita de mais tempo para completar um ciclo de actuação (aquecimento e arrefecimento), tornando o actuador mais lento.

Apesar dos bons resultados a nível académico que este controlador apresentou ao longo do estudo efectuado, este tipo de implementação e a sua viabilidade merecem também uma análise, por mais sucinta que seja, a nível económico. Por isso alerta-se para o facto de que implementações a uma escala maior, que pretendam atingir forças de actuação mais elevadas (possivelmente pela adição de mais elementos de SMA e adoptando outras configurações), acarretam um custo muito elevado, não só apenas ligados directamente aos elementos de SMA mas também ao dispêndio de energia necessário à activação dos elementos. Deve-se então ter em consideração este factor numa possível implementação deste tipo de actuador numa escala maior.

Numa análise crítica deste trabalho propõem-se como futuros trabalhos:

- O estudo da influência de um sistema de arrefecimento implementado no actuador, porventura pela introdução de ventoinhas no sistema em malha fechada, sobre a rapidez dos ciclos de actuação e consequentemente nas forças de actuação máximas.
- A implementação deste tipo de actuador noutra configuração, constituída por um número maior de fios, ou semelhante àquela estuda na secção 4.2.6 deste trabalho e estudo da sua eficiência também ao nível dos gastos energéticos pela sua actuação.

# Bibliografia

- [1] ALGA. *Algasism. High Damping Rubber Bearings. Lead Rubber Bearings*. [www.alga.it](http://www.alga.it).
- [2] ANADÓN, J.R.S. *Large force shape memory alloys linear actuator*. Master's thesis, Universidade da Florida, EUA, Agosto 2002.
- [3] ANDRAWES, B. e DESROCHES, R. Comparison between shape memory alloy seismic restrainers and other bridge retrofit devices. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 12: pp 700–709, 2007.
- [4] ASTROM, K.J. e MURRAY, R.M. *Feedback Systems*. Princeton University Press, 2008.
- [5] CISMAȘIU, C. e SANTOS, F.P.A. Numerical simulation of superelastic shape memory alloys subjected to dynamic loads. *Smart Materials and Structures*, vol. 17, 2008.
- [6] CISMAȘIU, C. (Editado por). *Shape Memory Alloys*. Scyio, Outubro 2010.
- [7] DARJAN, C. *Shape memory alloys*. Relatório Técnico, Faculdade de Matemática e Física, Universidade de Liubliana, Eslovénia, Janeiro 2007.
- [8] DESROCHES, R. *Application of shape memory alloys in seismic rehabilitation of bridges*. Relatório Técnico, IDEA project 65, Transportation Research Board of the National Academies, Fevereiro 2002.
- [9] DESROCHES, R. e DELEMONT. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures*, vol. 24(3): pp 325–332, 2010.
- [10] DESROCHES, R.; TAFTALI, B. e ELLINGWOOD, B.R. Seismic performance assesment of steel frames with sahape memory alloy connections. part i - analysis and seismic demands. *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 14(4): pp 471–486, 2010.
- [11] DOLCE, M.; CARDONE, D. e MARNETTO, R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 29: pp 945–968, 2000.
- [12] DOLCE, M.; CARDONE, D. e MARNETTO, R. SMA recentering devices for seismic isolation of civil structures. In *Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, volume 4330, pages 238–249. Julho 2001.
- [13] DUERIG, T.W. e PELTON, A.R. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, chapter Ti-Ni Shape Memory Alloys, pages pp 1035–1048. ASM International, 1994.
- [14] FERNANDES, J. *Solução de controlo passivo de um passadiço pedonal pré-fabricado, submetido a acções sísmicas*. Master's thesis, FCT/UNL, Junho 2012.

- [15] FERNANDES, D.; PERES, R.; MENDES, A. e ELIAS, C. Understanding the shape memory alloys used in orthodontics. *International Scholarly Research Network Dentistry*, 2011.
- [16] FIGUEIREDO, F. *Isolamento sísmico de base. Dimensionamento de sistemas de isolamento de base em edifícios*. Master's thesis, IST/UTL, Outubro 2007.
- [17] FUGAZZA, D. *Shape-memory alloy devices in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modelling and numerical simulations*. Master's thesis, Universidade de Pavia, Itália, Setembro 2003.
- [18] GÉDOUIN, P.A.; DELALEAU, E.; BOURGEOT, J.M.; JOIN, C.; CHIRANI, S.A. e CALLOCH, S. Experimental comparison of classical pid and model-free control: position control of a shape memory alloy active spring. *Control Engineering Practice*, vol. 19: pp 433–441, 2011.
- [19] HARTL, D. e LAGOUDAS, D.C. Aerospace applications of shape memory alloys. *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 221: pp 535–552, 2007.
- [20] HUANG, W. *Shape memory alloys and their application to actuators for deployable structures*. Ph.D. thesis, Universidade de Cambridge, Reino Unido, Março 1998.
- [21] JANKE, L.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. e RUTH, J. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - overview, limits and new adieas. *Material and Structures*, vol. 38: pp 578–592, 2005.
- [22] KAUFFMAN, G.B. e MAYO, Y. The story of nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications. *The Chemical Educator*, vol. 2, 1996.
- [23] LAGOUDAS, D.C. *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. Springer, 2008.
- [24] LEON, R.T.; DESROCHES, R. OCEL, J. e HESS, G. Innovative beam column using shape memory alloys. In *Structural Control and Health Monitoring*, volume 11, pages 1–36. 2004.
- [25] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. *LabVIEW Fundamentals*. 2005.
- [26] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. *PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual*. 2009.
- [27] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. *Getting Started with LabVIEW*. 2012.
- [28] OGATA, K. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 5<sup>th</sup> edition, 2010.
- [29] PELTON, A.R.; SHROEDER, V.; MITCHELL, M.R.; GONG, X.Y.; BARNEY, M. e ROBERTSON, S.W. Fatigue and durability of nitinol stents. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 1, 2008.
- [30] PEREIRA, L. *Ligas com memória de forma: características e aplicações em engenharia civil*. Master's thesis, FCT/UNL, Abril 2011.
- [31] PETRINI, L. e MIGLIAVACCA, F. Biomedical applications of shape memory alloys. *Journal of Metallurgy*, 2011, 2011.
- [32] RASHED, M.G.; AHSAN, R. e ISLAM, B. Civil engineering application of shape memory alloys. In *1st International Conference on Advances in Civil Engineering*. CUET, Chittagong, Bangladesh, 2012.

- [33] SANTOS, F.P.A. *Vibration control with shape-memory alloys*. Ph.D. thesis, FCT/UNL, Março 2011.
- [34] SENTHILKUMAR, P.; DAYANAMANDA, G.N.; UMAPATHY, M. e SHANKAR, V. Experimental evaluation of the shape memory alloy wire actuator with a modulated adaptive controller for the position control. *Smart Materials and Structures*, vol. 21, 2012.
- [35] SERAFIM, P. *Controlo de vibrações em engenharia civil. Caso de estudo: Aplicação de ligas de SMA na ponte de Santa Margarida do Sado*. Master's thesis, FCT/UNL, Setembro 2011.
- [36] SONG, G.; CHAUDHRY, V. e BATUR, C. Precision tracking control of shape memory alloy actuators using neural networks and sliding-mode based robust controller. *Smart Materials and Structures*, vol. 12: pp 223–231, 2003.
- [37] SONG, G.; MA, N. e LI, H.-N. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*, vol. 28: pp 1266–1274, 2006.
- [38] TAMAI, H. e KITAGAWA, Y. Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wires and its application to seismic resistance member for building. *Computational Material Science*, vol. 25: pp 218–227, 2002.
- [39] VELÁZQUEZ, R. e PISSALOUX, A. A comparison of controllers for improving the time response of NiTi wires. In *IEEE AFRICON*. Nairobi, Quénia, 2009.
- [40] Website. DYNALLOY, Inc. Makers of dynamic alloys, Setembro 2013.  
<http://www.dynalloy.com/TechDataWire.php>.
- [41] Website. Grand Illusions. Adereços para ilusionismo, Setembro 2013.  
[http://www.grand-illusions.com/acatalog/magic\\_teaspoon.html](http://www.grand-illusions.com/acatalog/magic_teaspoon.html).
- [42] Website. Ti Ni Aerospace. Products - Pinpuller P10-2941, Setembro 2013.  
<http://www.tiniaerospace.com/ppcustom.html>.
- [43] WILDE, K.; GARDONI, P e FUJINO, Y. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering Structures*, vol. 22: pp 222–229, 2000.